

24-110



# Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

## EVALUACION TECNICO-ECONOMICA DE SUBCONDUCTORES AISLADOS COMO MEDIO DE COMUNICACION.

**T R A B A J O**

Que presentan:

**ANTONIO ALBERTO RIOS VAZQUEZ**

y

**RICARDO ROMERO POLANCO**

Para obtener el título de:

**"INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA"**

México, D. F.

1981



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.

# TESIS CON FALLA DE ORIGEN

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

La creciente demanda de canales de comunicación en los sistemas de potencia, ha traído como consecuencia la posible utilización de un nuevo sistema de onda portadora, a través de subconductores aislados, el cual ha sido estudiado en otros países con el resultado de ofrecer amplias ventajas sobre el sistema de onda portadora.

Por lo anterior, hemos desarrollado el estudio de este nuevo sistema, para propósitos de nuestra tesis, esperando que esta aportación sea considerada como una posible ayuda en el futuro desarrollo de las comunicaciones en los sistemas de potencia en nuestro País.

El presente trabajo, para su estudio, lo hemos dividido en cinco capítulos:

En el primero de ellos, se describe brevemente el Plan de Desarrollo del Sector Eléctrico Nacional 1977-1986, mencionando los niveles que en este período alcanzarán las plantas generadoras, subestaciones y líneas de transmisión. Asimismo, se menciona la necesidad de contar con medios confiables de comunicación para el correcto suministro de energía eléctrica, enunciando las ventajas y desventajas que presentan los sistemas de comunicación existentes en los sistemas de potencia.

En el segundo capítulo, se describe el Sistema de Onda Portadora sobre Líneas de Alta Tensión (OPLAT), explicando el funcionamiento de sus componentes, sus principales características, y su utilización en los sistemas de potencia.

Por otra parte, en el tercer capítulo, son mencionadas las ventajas de utilizar subconductores de una misma fase, tanto en la transmisión de energía eléctrica, como de señales de comunicación, al mantener dichos subconductores debidamente aislados

entre sí, llamándosele al sistema resultante Onda Portadora sobre Sub-Conductores Aislados (OPSA). Igualmente, son explicadas las diferencias entre este sistema y el sistema OPLAT, mencionando las mejoras que se obtienen al utilizar subconductores aislados de una misma fase como medio de comunicación.

En el cuarto capítulo, se lleva a cabo una comparación económica entre los sistemas OPLAT y OPSA, en base al costo que acarrea la utilización de espaciadores y ensambles de suspensión aislantes en este último sistema, y a las mejoras que se tienen con el empleo de trampas de un cuarto de longitud de onda, aunado al mayor número de canales permitidos en el sistema OPSA.

Finalmente, en el quinto capítulo, se comparan los niveles de las principales características encontradas en los sistemas OPLAT y OPSA, lográndose con dicha comparación, la formulación de importantes conclusiones relacionadas con el empleo del sistema OPSA como medio de comunicación en los sistemas de potencia.

Para poder desarrollar esta tesis, se hizo una recopilación del material referente al tema, el cual es escaso en número y algunas veces en información. Después de haberlo clasificado, se procedió a estudiarlo, lográndose por tal motivo, planear la elaboración de los capítulos que forman este trabajo. Este material está compuesto principalmente por artículos publicados por diversas asociaciones mundiales ingenieriles, así como también con diversos libros referentes al tema.

Asimismo, se tuvo la oportunidad de contar con asesoría proporcionada por investigadores extranjeros, lográndose con ésto, aclarar puntos oscuros referentes a algunos temas; así como información proporcionada por la C.F.E. referente a las características y costos de líneas de transmisión de 400KV, que actualmente funcionan en el País.

CAPITULO I

COMUNICACIONES EN SISTEMAS DE POTENCIA

I N D I C E    D E L    C A P I T U L O    I .

		<u>PAGINA</u>
1.1	FUTURO DESARROLLO DEL SECTOR ELECTRICO NACIONAL	3 - I
1.2	COMUNICACIONES EN SISTEMAS DE POTENCIA	5 - I



## 1.1 FUTURO DESARROLLO DEL SECTOR ELECTRICO NACIONAL

La tendencia hacia el crecimiento, experimentada en la industria moderna, así como el acelerado aumento de población, han ocasionado una creciente demanda de energía eléctrica en el mundo. Esta demanda actualmente es de aproximadamente 8,000 millones de KWh anuales y aumenta a razón de 8% cada año.

En México, el único proveedor de energía eléctrica, la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.), se enfrenta al problema de satisfacer la demanda de electricidad a una población y a una industria con tasas anuales de crecimiento de 3% y de 8 a 10% respectivamente.

Con el objeto de satisfacer las necesidades de energía, se ha puesto en marcha un ambicioso plan de desarrollo del sector eléctrico nacional (1977-1986), en el cual se prevee aumentar la capacidad instalada de 10.6 millones de KWh existentes en 1977, a 23.6 millones de KWh en 1986. Como parte de este programa, la C.F.E. espera al término de la presente administración (1982), poner en operación :

- a) Plantas generadoras : el sector eléctrico pondrá 8.95 millones de KWh en operación.
- b) Subestaciones : Se planea la construcción de subestaciones con una capacidad total de 35,000 MVA.
- c) Líneas de transmisión: se construirán casi 14,000 KM de nuevas líneas. Aproximadamente 4,200 KM corresponden a líneas de 400KV, otros 4,400 KM serán asignados a líneas de 230 KV y los 5,400 res-

tantes serán para líneas de 60 y 130 KV.

- d) Distribución: las redes de distribución serán expandidas para entregar energía a nuevos usuarios instalándose 7,000 MVA, para cubrir las necesidades del País.

De lo anterior, resulta obvio que debido a la gran demanda de energía eléctrica en los próximos años, la red eléctrica nacional, crecerá día a día, lo que traerá como consecuencia una mayor complejidad en su operación y funcionamiento de la misma.

Es por tanto necesario que para lograr una eficiente operación de la red, se implementen sistemas de control y supervisión adecuados, siendo imprescindible para ello, contar con medios de comunicación confiables, versátiles y económicos.

## 1.2 MEDIOS DE COMUNICACION EN SISTEMAS DE POTENCIA

Para satisfacer las necesidades de información entre los centros de generación, los consumidores, las subestaciones y los centros de control, las compañías generadoras de energía eléctrica han recurrido a diversos medios de comunicación, siendo éstos :

- Red Telefónica
- Radio (VHF, UHF, SHF )
- Onda portadora ( en sus diversas versiones)
- Fibra Optica

### a) Red Telefónica :

Este sistema, como su nombre lo indica, consiste en la utilización de las redes telefónicas para la transmisión de señales de comunicación, propias de un sistema de potencia. Con el transcurso del tiempo, su uso ha venido disminuyendo por las desventajas de tener que depender de una entidad ajena, de los problemas de congestión de la red y la aplicación de elevadas tarifas que pueden hacer incosteable la utilización de este servicio.

### b) Radio :

Los sistemas de radio utilizados son divididos en microondas (UHF y SHF) y radio en VHF. Las principales ventajas que hacen atractivo el uso de microondas en los sistemas de potencia son:

- . Proporcionar gran número de canales de alta calidad y confiabilidad.
- . El sistema está físicamente separado de la red de potencia.
- . Alta directividad con el consecuente aprovechamiento del espectro de frecuencia.

Las desventajas que pueden mencionarse son :

- . La dependencia de otras entidades fuera de la empresa en la selección, uso y protección de frecuencias.
- . El tener muchos canales juntos en un enlace, hace peligroso la falla de éste, ya que se pierde gran cantidad de información.
- . El uso de estaciones repetidoras, representa un riesgo para la confiabilidad, por el mayor número de unidades requeridas.

Las comunicaciones en VHF se utilizan para la cobertura de programas de reparación y mantenimiento, en operaciones de rutina o de emergencia. Pueden clasificarse de la siguiente forma :

- De estación base a unidad móvil
- De unidad móvil a unidad móvil
- De punto a punto

Las ventajas que este sistema presenta son :

- . Flexibilidad en la operación y adaptabilidad

a diversas situaciones.

- . Gran movilidad.
- . Disponibilidad durante fallas del sistema eléctrico.

Entre las desventajas se tienen :

- . Capacidad limitada
- . Corto alcance.
- . Poca flexibilidad para usos diversos
- . Congestionamiento de frecuencias

c) Sistemas de Onda Portadora :

Estos sistemas utilizan las líneas de alta tensión como medio de propagación de las señales de comunicación. Su principal variante la constituye la utilización de las 3 fases de un sistema de potencia, llamándosele a este sistema Onda Portadora sobre Líneas de Alta Tensión (OPLAT), cuyas principales ventajas son las siguientes :

- Capacidad para satisfacer una mediana demanda de canales.
- Gran confiabilidad derivada de la robustez de la línea.
- No requiere de repetidoras para cubrir grandes distancias.

Sin embargo, la creciente necesidad de nuevos canales de comunicación, ha tenido como consecuencia la saturación del espectro disponible en este sistema, lo que ha hecho necesario seleccionar otras alternativas de comunicación para aprovechar las ventajas ofrecidas por las líneas de transmisión. Dos de estos sistemas son el Hilo de Guarda Aislado (HGA) y el método de Onda Portadora sobre Subconductores Aislados (OPSA). El primero de ellos se ha utilizado con bastante frecuencia en transmisión de canales de voz; mientras que el segundo, un método más reciente, además de proporcionar las ventajas del sistema OPLAT, ofrece una serie de mejoras en comparación con el, lo cual permite que sea considerado como un prometedor sistema para la solución del problema de comunicación en las compañías generadoras de energía eléctrica.

Es objeto de los capítulos posteriores, el describir los sistemas OPLAT y OPSA, así como analizar la serie de ventajas que este último reporta sobre el primero.

#### d) Fibra Optica :

Este sistema resulta ser particularmente interesante dentro del sector eléctrico, por el hecho de que las fibras ópticas son inmunes a la interferencia causada por campos electromagnéticos, presentes en plantas y subestaciones. Presentando diversas ventajas, siendo principalmente :

##### i. Comunicaciones

- . Inmunidad a la interferencia electromagnética
- . Gran ancho de banda
- . Aislamiento eléctrico
- . Niveles bajos de diafonía

ii. Medición

- . Libre de efectos de saturación
- . Mediciones pasivas
- . Alta sensibilidad
- . Bajo costo ( no depende del voltaje del sistema)
- . Sencillez en el acoplamiento a sistemas de comunicación óptica

Entre las desventajas pueden mencionarse :

- La complejidad de los sistemas electrónicos para procesar y detectar las señales ópticas.
- Costo y atenuación de las fibras actualmente disponibles.
- Cableado y manejo de las fibras.
- Compatibilidad con el equipo existente.

Este sistema de comunicación se encuentra aún en una etapa de desarrollo, y es de esperarse que a mediano plazo, se alcancen grandes avances tecnológicos y reducciones substanciales en los costos de producción, para hacer este sistema económica y técnicamente factible en los sistemas de potencia.

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

CAPITULO I

- (1) ELECTRIFICATION WEATHERS HARD TIMES AND FINDS NEW WAYS  
TO KEEP THE LIGHT IN THE WINDOW.

MEXICAN-AMERICAN REVIEW - Septiembre, 1980.

- (2) Tovar Martínez J.A. - TELECOMUNICACIONES EN SISTEMAS DE  
POTENCIA.



C A P I T U L O

I I

DESCRIPCION GENERAL DE LOS SISTEMAS DE ONDA  
PORTADORA SOBRE LINEAS DE ALTA TENSION (OPLAT)

## I N D I C E

	<u>PAGINA</u>
2.1 DESCRIPCION GENERAL DEL SISTEMA OPLAT	4 - II
2.2 LINEAS DE TRANSMISION A FRECUENCIAS DE ONDA PORTADORA.	6 - II
2.3 TIPOS DE ACOPLAMIENTO	18 - II
2.4 CIRCUITOS DE ACOPLAMIENTO Y SINTONIA	24 - II
2.5 ANALISIS MODAL	36 - II
2.6 EQUIPOS TERMINALES	43 - II
2.7 ESPECTRO Y ASIGNACION DE FRECUENCIAS	46 - II
2.8 APLICACIONES DEL SISTEMA OPLAT	49 - II
2.9 VENTAJAS Y DESVENTAJAS QUE PRESENTA EL SISTEMA OPLAT.	51 - II

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

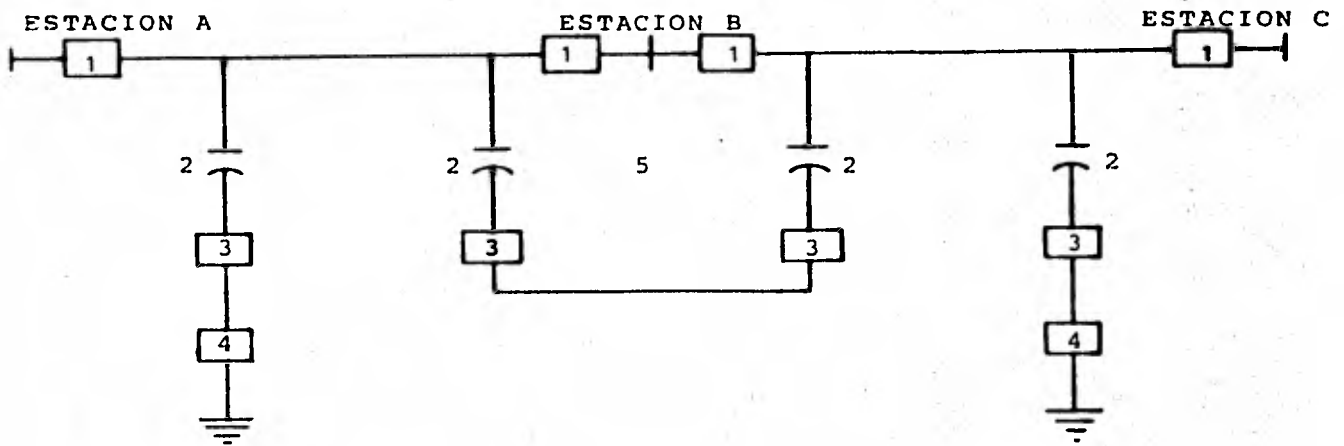
En este capítulo se describe el Sistema de Onda Portadora sobre Líneas de Alta Tensión (OPLAT) mencionando aspectos importantes en su estructura y funcionamiento como son los dispositivos que forman el sistema físicamente, las principales características que presenta OPLAT como medio confiable de comunicación, tanto en los equipos de transmisión y equipos de acoplamiento, como en la línea de transmisión, y las ventajas e inconvenientes que presenta su aplicación en sistemas de potencia formados por líneas de transmisión trifásicas.

## 2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA DE ONDA PORTADORA SOBRE LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN

El sistema de Onda Portadora sobre Líneas de Alta Tensión (OPLAT), es un método de comunicación que consiste en la propagación de ondas de radio de baja frecuencia (onda portadora) sobre las líneas de transmisión trifásicas que forman parte de los sistemas de potencia. La mayoría de las compañías suministradoras de energía eléctrica en el mundo, utilizan este sistema para satisfacer sus necesidades de comunicación como pueden ser : telefonía, telemedición, control y protección.

Como muestra la figura 2.1 un sistema OPLAT, está formado por tres partes principales, siendo éstas :

- a) Los equipos terminales; que consisten en los transmisores, receptores y equipos asociados, por medio de los cuales se generan y se recuperan las señales de comunicación.
- b) Los equipos de sintonización y acoplamiento; formados por capacitores de acoplamiento, transformadores de voltaje, trampas de onda, filtros de acoplamiento y circuitos de puenteo, los cuales proveen un medio para conectar los equipos terminales a los puntos seleccionados para acoplamiento en las líneas de transmisión, y
- c) Las líneas de alta tensión; formadas por los conductores de fase, y que sirven de vía de comunicación para las corrientes de onda portadora entre las terminales.



1. Trampa de Onda
2. Capacitor de Acoplamiento
3. Filtro de acoplamiento
4. Equipos terminales
5. Circuito de puenteo

FIGURA 2.1

A continuación serán descritos los componentes de cada una de estas partes .

## 2.2 LINEAS DE TRANSMISION A FRECUENCIAS DE ONDA PORTADORA

Las líneas de transmisión de alto voltaje presentan tres características que son de vital importancia conocer, para la obtención de un enlace de comunicaciones confiable. Estas características son : la impedancia característica de la línea, la atenuación que ésta presenta y el nivel de ruido e interferencia propio de la misma.

### 2.2.1 Impedancia Característica.

La impedancia característica de la línea ( $Z_c$ ), que tiene un valor constante e independiente de la longitud de la misma, se define como la impedancia de entrada de una línea de longitud infinita, y es función de las resistencias e inductancias en serie y de las conductancias y capacitancias en paralelo de la línea, todas expresadas en valores por unidad de longitud. De tal manera,  $Z_c$  puede ser expresada como :

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad [\Omega] \quad \text{--- (2.1)}$$

donde :

- R = resistencia en Ohms por unidad de longitud
- L = inductancia en Henrys por unidad de longitud.
- G = Conductancia en paralelo en mhos por unidad de longitud.
- C = capacitancia en paralelo en farads por unidad de longitud, y
- $\omega = 2\pi f$ , donde f es la frecuencia en ciclos por segundo (Hertz)

Cuando las líneas de transmisión operan a altas frecuencias, como en el caso de ondas portadoras, los parámetros  $J\omega L$  y  $J\omega C$  son mucho más grandes que  $R$  y  $G$  respectivamente, con lo que la ecuación (2.1), puede ser expresada como :

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad [\Omega] \quad - - - - - (2.2)$$

pudiendo también expresarse como :

$$Z_c = 120 \ln \frac{d}{r} = 276 \log \frac{d}{r} \quad [\Omega] \quad - - - - - (2.3)$$

donde :             $d$  = Distancia entre conductores  
                        $r$  = Radio de los conductores.

Existe muy poca variación en el valor de la impedancia característica entre líneas con un solo conductor por fase, operando a diferentes voltajes. En sistemas con conductores en haz\*, son observados menores valores de este parámetro, debido a que el radio equivalente de cada fase es considerablemente mayor que el de un solo conductor.

La importancia del conocimiento del valor de la impedancia característica radica principalmente en que al conocerlo se pueden reducir las pérdidas por acoplamiento, pues se podrá seleccionar adecuadamente el valor del capacitor de acoplamiento. Además es importante para la consideración de las pérdidas del sistema debido a que un desajuste entre la impedancia de la línea y una impedancia de carga diferente a ella ocasiona pérdidas.

---

\* Dos o más subconductores por fase al mismo potencial, sirviendo como un conductor de la línea.

En la Tabla 2.1, son presentados valores de la impedancia característica para un conductor por fase y para diferentes tipos de acoplamiento

TIPO DE ACOPLAMIENTO	IMPEDANCIA CARACTERISTICA
FASE A TIERRA	350 - 500 $\Omega$
FASE A FASE	650 - 800 $\Omega$

Tabla 2.1

### 2.2.2 Atenuación.

La segunda característica que es importante conocer para la mejor utilización de las líneas de alta tensión para fines de comunicación, es la atenuación que presentan las mismas.

La atenuación es la reducción de potencia de la señal de comunicación en un dispositivo o medio transmisor entre dos puntos sobre un sistema. Debido a lo anterior, las pérdidas presentes pueden ser expresadas en dB.

Como al trabajar a frecuencias de portadora, los valores de R y G pueden ser despreciados, la parte real de la constante de propagación, que representa la constante de atenuación, puede ser expresada en una línea como :

$$\alpha = \frac{4.34 R}{2 Z_c} \quad [dB/m] \quad - - - - - (2.4)$$



Donde :

R = Resistencia

Z<sub>c</sub> = Impedancia característica

Dentro de un sistema OPLAT las fuentes más comunes de atenuación son :

- a) Pérdidas en el cable coaxial,
- b) Pérdidas en el equipo de sintonía y acoplamiento,
- c) Pérdidas debidas al tipo de acoplamiento,
- d) Pérdidas debidas a circuitos de puenteo,
- e) Pérdidas en la línea de transmisión,
- f) Pérdidas debidas a discontinuidades en la línea de transmisión.

A continuación cada una de estas fuentes de atenuación será tratada.

a) Pérdidas en el cable coaxial :

Generalmente se trata de acoplar la impedancia de la línea de transmisión de alto voltaje a la impedancia del cable coaxial usado entre el equipo terminal y la unidad de sintonía. Para esto, es utilizado un transformador de acoplamiento en la unidad de sintonía. Las pérdidas típicas de un cable coaxial en función de la frecuencia, están dadas en la tabla 2.2:

FRECUENCIA (KHz)	PERDIDAS (dB POR 100 MTS)
50	.105
100	.164
150	.197
200	.246

(Cont)

FRECUENCIA (KHz)	PERDIDAS (dB por 100 mts)
250	.287
300	.295
350	.335
400	.369
450	.400
500	.431

Tabla 2.2

b) Pérdidas en el equipo de sintonía y acoplamiento:

Las pérdidas en el equipo de sintonía y acoplamiento pueden ser calculadas con bastante exactitud, dado que los factores de calidad de la inductancia y el capacitor de acoplamiento son conocidos al igual que la impedancia característica de la línea. Para su cálculo se utiliza la siguiente ecuación:

$$dB = 10 \log_{10} \frac{Z_c + R_c \left( 1 + \frac{Q_c}{Q_l} \right)}{Z_c} \quad \text{--- (2.5)}$$

Donde :

$Z_c$  = Impedancia característica de la línea [ $\Omega$ ]

$R_c$  = Componente resistiva de la impedancia del capacitor de acoplamiento [ $\Omega$ ]

$Q_c$  = Factor de calidad del capacitor (adimensional).

$Q_l$  = Factor de calidad de la inductancia (adimensional).

En general,  $Q_l$  fluctúa entre 50 y 80 para el rango de 50-150KHz y  $Q_c$  se puede considerar con un valor de 30.

Sin embargo, es permisible para fines de estimación suponer una pérdida de 1 dB para una combinación simple capacitor-inductancia, trabajando sobre una línea abierta.

c) Pérdidas debidas al tipo de acoplamiento:

La atenuación de la línea se ve afectada por el método de acoplarse a la línea debido a que la energía de onda portadora aplicada al sistema por medio de los circuitos de acoplamiento, se distribuye entre los conductores y tierra dependiendo de la interconexión de las impedancias características de estos elementos, así como de cualquier impedancia terminal que pueda estar conectada a la línea.

Con el acoplamiento de fase a fase, la mayor parte de la energía transmitida se encuentra entre los conductores acoplados. Si la cantidad de energía entre los conductores y tierra es comparativamente pequeña, y si se logra un balance completo, el tercer conductor no conducirá ninguna corriente portadora.

Una diferente distribución de energía, se obtiene en el acoplamiento de fase a tierra. Parte de la energía de portadora se pierde cuando fluye hacia la estación por medio de los dos conductores no acoplados. Una parte de la energía restante se distribuye entre los conductores y tierra, mientras que el resto se distribuye simétricamente entre el conductor acoplado y los no acoplados. Como resultado de las altas pérdidas de tierra, la porción entre los conductores y tierra sufren una atenuación mucho mayor que la porción entre los conductores.

Mientras que, para el acoplamiento de fase a fase, la atenuación se considera despreciable, para el acoplamiento de fase a tierra la magnitud de las pérdidas es aproximadamente de 2 a 3.5dB. (Ver Sección 2.5).

d) Pérdidas debidas a circuitos de puenteo:

Las pérdidas en circuitos de puenteo son al menos dos veces mayor que las del equipo de acoplamiento debido a que dos conjuntos de capacitores de acoplamiento y sintonizadores son involucrados. Valores típicos encontrados son de -5 a -9 db.

e) Pérdidas en líneas de transmisión:

La atenuación de una línea de transmisión a las frecuencias de portadora, está sujeta a muchos factores, tales como el voltaje de la línea, lo cual afecta su construcción y su nivel de aislamiento; geometría de la línea, conductores de fase ( tamaño, material, condiciones de superficie, etc.), método de acoplamiento, tipo y localización de transposiciones, condiciones climatológicas, conductividad del terreno y pérdidas en el aislamiento.

Las pérdidas en la línea se incrementan con el incremento de la frecuencia de la portadora, debido al aumento de las pérdidas por radiación, pérdidas en el dieléctrico, aterrizamiento y estructura de la torre. La tabla 2.3 muestra los valores de atenuación para diferentes líneas de transmisión.

---

FRECUENCIA EN KHz	ATENUACION APROXIMADA EN dB POR KILOMETRO.					
	ACOPLAMIENTOS FASE A FASE			ACOPLAMIENTOS FASE A TIERRA		
	230 KV	161 KV	115 KV	230 KV	161 KV	115 KV
50	.031	.037	.047	.039	.046	.059
100	.047	.053	.063	.059	.066	.079
150	.066	.071	.084	.083	.089	.105
200	.086	.106	.126	.108	.133	.158
250	.107	.118	.147	.134	.148	.185
300	.124	.130	.163	.155	.163	.210
350	.145	.165	.200	.181	.206	.258
400	.175	.212	.252	.219	.265	.315
450	.201	.224	.273	.251	.280	.341
500	.225	.236	.294	.281	.295	.363

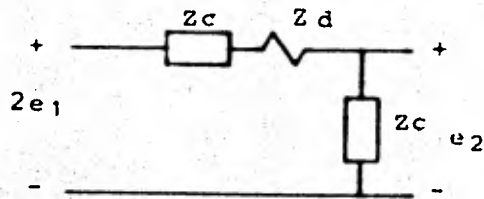
Tabla 2.3

f) Pérdidas debidas a discontinuidades en la línea:

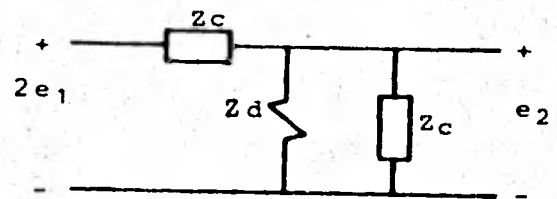
En una línea de transmisión, existen discontinuidades en serie y en paralelo, las cuales ocasionan que la impedancia, vista en un punto, sea diferente a la impedancia característica en ese mismo punto, lo cual origina ondas estacionarias y reflexiones que producen pérdidas en la señal de comunicación.

Para el cálculo de estas atenuaciones, se tienen los siguientes circuitos :

a) Discontinuidad en serie



b) Discontinuidad en paralelo



$$e_2 = \frac{2Z_c}{2Z_c + Z_d} e_1 \quad \text{--- (2.6.a)} \quad e_2 = \frac{Z_d // Z_c}{Z_c + Z_d // Z_c} 2e_1 \quad \text{--- (2.7.a)}$$

$$e_2 = \frac{2e_1 Z_c}{\left[ (2Z_c + R_d)^2 + X_d^2 \right]^{1/2}} \quad \text{--- (2.6.b)} \quad e_2 = \frac{2e_1 \sqrt{R_d^2 + X_d^2}}{\left[ (Z_c + R_d)^2 + X_d^2 \right]^{1/2}} \quad \text{--- (2.7.b)}$$

Por lo tanto :

a) Para discontinuidades en serie :

$$dB = 20 \log_{10} \frac{e_1}{e_2} \quad \text{--- (2.8)}$$

$$dB = 20 \log_{10} \frac{\left[ (2Z_c + R_d)^2 + X_d^2 \right]^{1/2}}{2Z_c} \quad \text{--- (2.9)}$$

b) Para discontinuidades en paralelo :

$$dB = 20 \log_{10} \frac{\left[ (Z_c + R_d)^2 + 4X_d^2 \right]^{1/2}}{2 \left( R_d^2 + X_d^2 \right)^{1/2}} \quad \text{--- (2.10)}$$

Donde :

- $Z_c$  = Impedancia característica de la línea
- $Z_d = R_d + jX_d$  = Impedancia de la discontinuidad
- $R_d$  = Componente resistiva de  $Z_d$
- $X_d$  = Componente reactiva de  $Z_d$

Asímismo, un cálculo aproximado de la atenuación que sufren las señales de comunicación en los sistemas OPLAT, puede ser realizado mediante el empleo de la gráfica que aparece en la figura 2.2, la cual fué obtenida para líneas con voltaje de operación de 60 a 400KV, operando en un rango de frecuencia de 50 a 400 KHz.

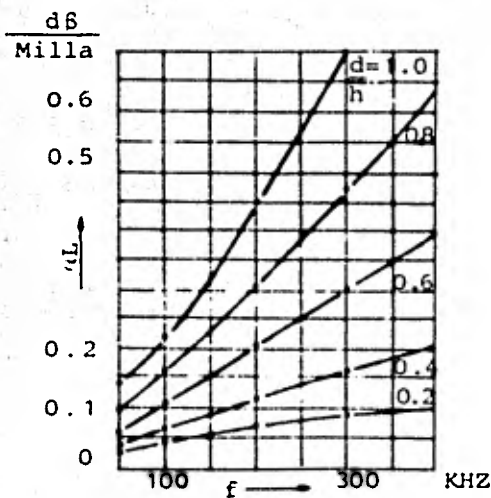


Figura 2.2

### 2.2.3 Niveles de Ruido.

Uno de los criterios básicos del comportamiento de cualquier circuito de comunicación, es la relación señal a ruido. La estimación de la atenuación, que ha sido tratada en el inciso anterior, permitirá conocer la magnitud de la señal en el receptor. El otro factor que interviene en ella, el ruido, será el tema tratado en este inciso.

El ruido puede ser clasificado, de acuerdo a sus características, en aleatorio e impulsivo.

El ruido aleatorio es aquel con un espectro continuo, que resulta de la ocurrencia aleatoria de un número infinito de descargas pequeñas, las cuales no son distinguibles por separado. En los sistemas OPLAT puede aparecer como resultado de agitación térmica corona en los conductores, descargas atmosféricas, y como resultado de descargas eléctricas irregulares a través de aisladores y conductores.

Por otro lado, el ruido impulsivo consiste en pulsos discretos, cada uno de los cuales es identificable con una descarga eléctrica específica, pudiendo tener una repetición aleatoria, o bien regular debido a la naturaleza cíclica del voltaje de la señal de potencia. Las descargas aleatorias pueden esperarse como consecuencia de operaciones de conmutación, fallas en la línea, y descargas atmosféricas.

La mayoría del ruido aleatorio presente en las líneas de transmisión de alta tensión es el debido al efecto corona\*, el cual presenta valores típicos mostrados en la table 2.4 y 2.5

VOLTAJE DEL SISTEMA (KV)	NIVEL DE RUIDO CORONA (RMS) (dB)
100	-35 dBm
220	-20 dBm
400-765	0-(-10) dBm

Tabla 2.4

---

\* Véase Sección 3.8



VOLTAJE DEL SISTEMA (KV)	NIVEL DE RUIDO CORONA (RMS) (dB )
110	-35
220	-17
380	- 8

Tabla 2.5

Un sistema OPLAT puede sufrir interferencias causadas por la transmisión de radio, o por otros transmisores de OPLAT que se encuentren cercanos a la línea. Esto es debido a que la línea de transmisión frecuentemente forma una malla cerrada y frecuencias de OPLAT utilizadas en una sección de la línea pueden ser inducidas en otras con un nivel lo suficientemente alto para causar interferencia. Debido a ésto, es adecuado contar con un plan de asignación de frecuencias que evite este tipo de interferencia. En la práctica, esta interferencia es evitada al utilizar la misma frecuencia de OPLAT cada 3 secciones de la línea.

### 2.3 TIPOS DE ACOPLAMIENTO.

Existen diversas formas de acoplar la señal de comunicación a la línea de alta tensión. Las señales de portadora, generalmente fluyen en las tres fases y tierra\*, por lo que la eficiencia del acoplamiento de estas señales dependerá del tipo que se utilice.

En líneas de transmisión, los métodos de acoplamiento utilizados, son los siguientes :

- MODO 3
- ENTRE FASES , que a su vez se clasifican en :
  - a) Fase central a tierra
  - b) Fase central a fase externa
  - c) Fase externa a tierra
- ENTRE CIRCUITOS

Los acoplamientos en Modo 3 y entre fases son utilizados en un solo sistema trifásico de potencia, mientras que el acoplamiento entre circuitos es utilizado para acoplar señales de comunicación entre dos circuitos separados. A continuación se explicará la forma en la que se realizan estos tipos de acoplamiento.

---

\* Ver Sección 2.5 , que trata el Análisis Modal. Un estudio más estricto considera también los hilos de guarda, así como diferencias entre impedancias de la línea. Para un análisis de este tipo, ver Perz, Natural Modes on Horizontal H.V. Lines, IIE, Trans. PAS.

### 2.3.1 Acoplamiento en Modo 3.

Este tipo de acoplamiento es el que, teóricamente, produce menores pérdidas al introducir las señales de comunicación a la línea de alta tensión. Este método tiene la ventaja de proporcionar una alta confiabilidad para los canales de comunicación, debido a que puede soportar fallas de una fase y dos fases a tierra, sin que sea atenuada la señal de comunicación completamente.

Un arreglo utilizado para el acoplamiento de Modo 3, es mostrado en la figura 2.3. Puede observarse que se utilizan dos transformadores de acoplamiento\*, para lograr que la corriente inyectada al conductor central de la línea esté desfasada  $180^\circ$  respecto a las corrientes que circulan en las otras dos fases. La desventaja que presenta este tipo de acoplamiento es la de involucrar un alto costo, debido al numeroso equipo utilizado ( 3 conjuntos de equipos de sintonización y acoplamiento).

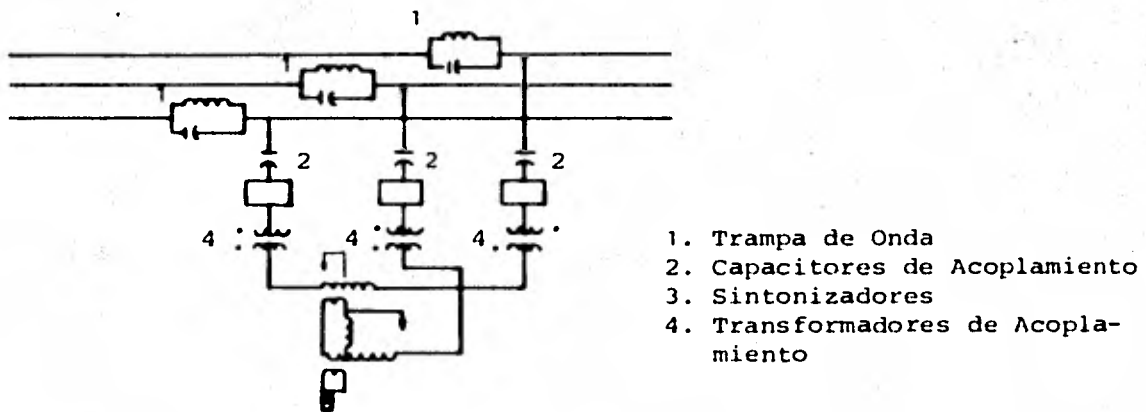


Figura 2.3

\* Ver Sección 2.4.2.

### 2.3.2 Acoplamiento entre fases.

#### a) Acoplamiento fase central a tierra:

Este tipo de acoplamiento es el más simple y frecuentemente utilizado, ya que usa la mínima cantidad de equipo, lográndose además una buena eficiencia ( $\approx -1.8$  dB por sección). La mayor desventaja que presenta, es que al ocurrir una falla a tierra de la fase acoplada, la señal de comunicación puede sufrir una gran atenuación, o perderse totalmente. La figura 2.4 muestra la forma en la que se realiza este tipo de acoplamiento.

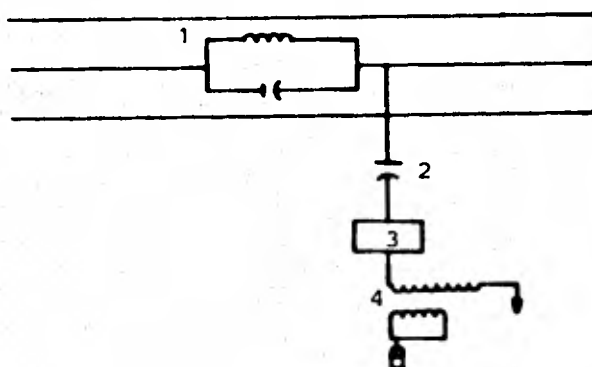


Figura 2.4

#### b) Acoplamiento fase externa a tierra:

Además de presentar la desventaja del acoplamiento fase central a tierra, este tipo de conexión es el que presenta mayores pérdidas\*, siendo mostrado su arreglo en la figura 2.5.

---

\* Ver Sección 2.5

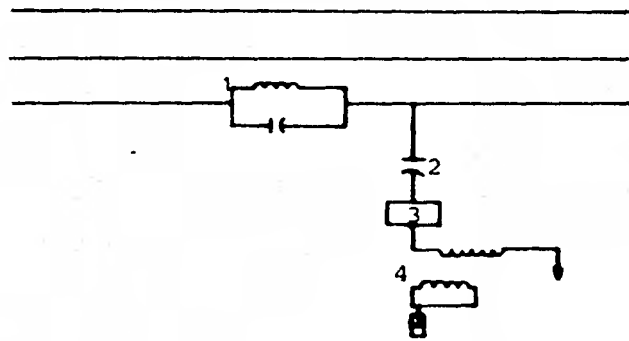


Figura 2.5

c) Acoplamiento fase central a fase externa:

Este tipo de acoplamiento es el segundo más utilizado. En él, las dos corrientes tienen igual magnitud, pero están desfasadas  $180^\circ$ . Tiene la ventaja de ser más eficiente que el acoplamiento de fase central a tierra, pero su costo es mayor debido a que utiliza el doble de equipo que este último. La figura 2.6 muestra este tipo de acoplamiento.

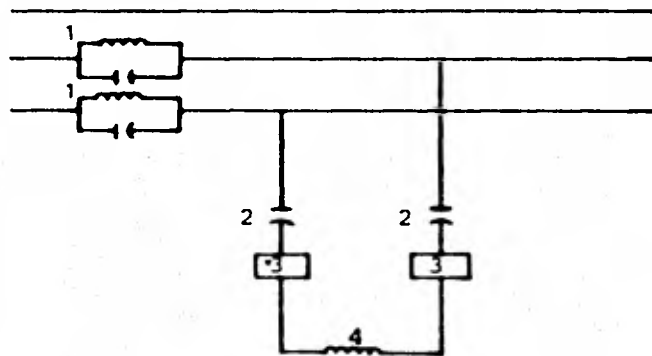


Figura 2.6

2.3.3 Acoplamiento entre Circuitos.

Este tipo de acoplamiento es generalmente un acoplamiento de la fase central de un sistema a la fase central del otro, proporcionando de tal manera dos trayectorias redundantes para la señal de comunicación.

Este tipo de arreglo es mostrado en la figura 2.7.

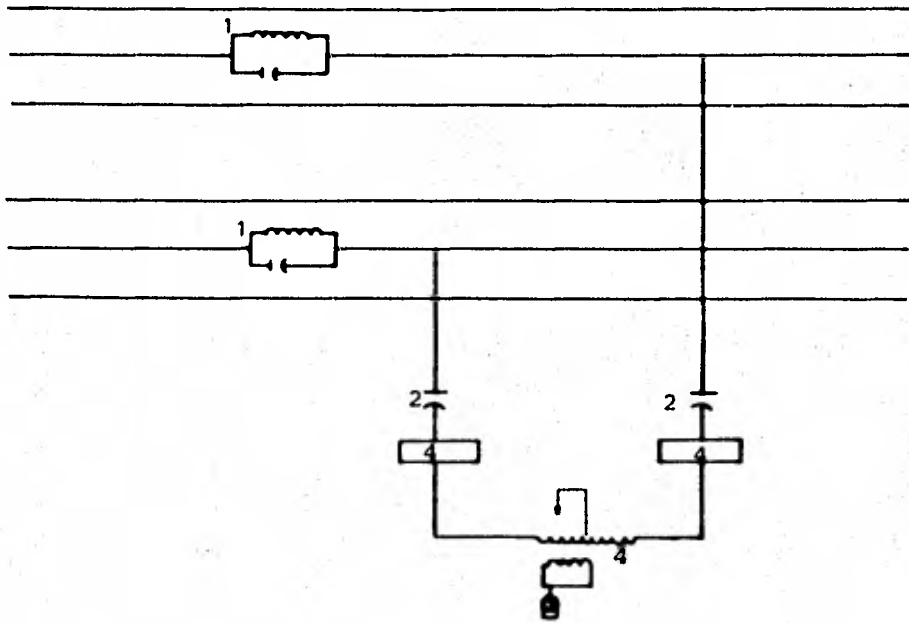


Figura 2.7

## 2.4 CIRCUITOS DE ACOPLAMIENTO Y SINTONIA

La función de los circuitos de acoplamiento y sintonía en un sistema OPLAT es la de proporcionar un enlace eficiente entre la línea de transmisión de alta tensión y los equipos de comunicación, además de proteger al personal y equipo de comunicación contra peligros ocasionados por la misma línea.

Los elementos que forman los equipos de acoplamiento y sintonía son los capacitores de acoplamiento, transformadores de voltaje, trampas de onda, filtros de acoplamiento y circuitos de puenteo. Cada uno de ellos será explicado a continuación.

### 2.4.1 Capacitores de Acoplamiento

Los capacitores de acoplamiento proporcionan un medio de conexión entre la línea de alto voltaje y las terminales del equipo de comunicación al ofrecer una alta impedancia a la señal de potencia y una baja resistencia al paso de señales de comunicación. Como consecuencia, deben estar fabricados con una resistencia capaz de soportar cualquier condición existente en la línea. Asimismo su función también consiste en proveer una reducción en el voltaje de la señal de energía con el objeto de permitir el uso del equipo de comunicación de bajo voltaje.

#### a) Construcción:

Los capacitores de acoplamiento están físicamente compuestos de varios elementos capacitivos conectados en serie y sumergidos en aceite. Se encuentran contenidos en un cilindro de porcelana con aletas laterales. Además, están equipados con una base metálica circular para fines de auto-soporte y montaje, tal como puede observarse en la figura 2.8.



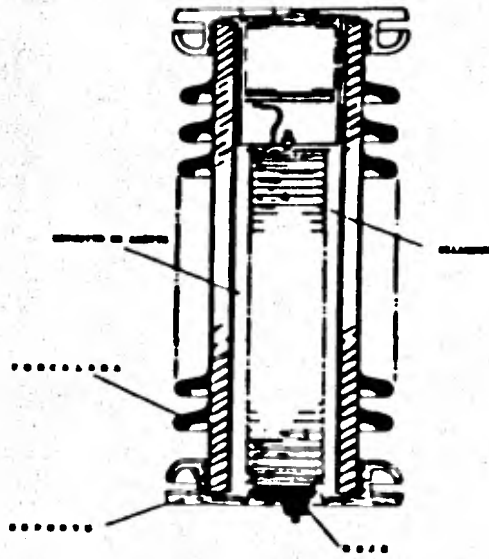


Figura 2.8

El valor de la capacitancia de los capacitores de acoplamiento es determinado por un compromiso entre el costo involucrado en su fabricación y los requerimientos de las aplicaciones de comunicaciones en el sistema.

#### 2.4.2 Transformador de Voltaje Capacitivo.

Otra alternativa para llevar a cabo el acoplamiento entre la línea de alta tensión y el equipo de comunicación, es mediante el empleo de los transformadores de voltaje capacitivo (T.V.C.).

El T.V.C. es un dispositivo que es conectado entre la fase y tierra de la línea de transmisión con el objeto de proporcionar una fuente de bajo voltaje para fines de operación de relevadores e instrumentos. Esto, es esencialmente un divisor de voltaje diseñado como un capacitor de potencia, y provisto de un tap para medición. Su diagrama es mostrado en la figura 2.9.

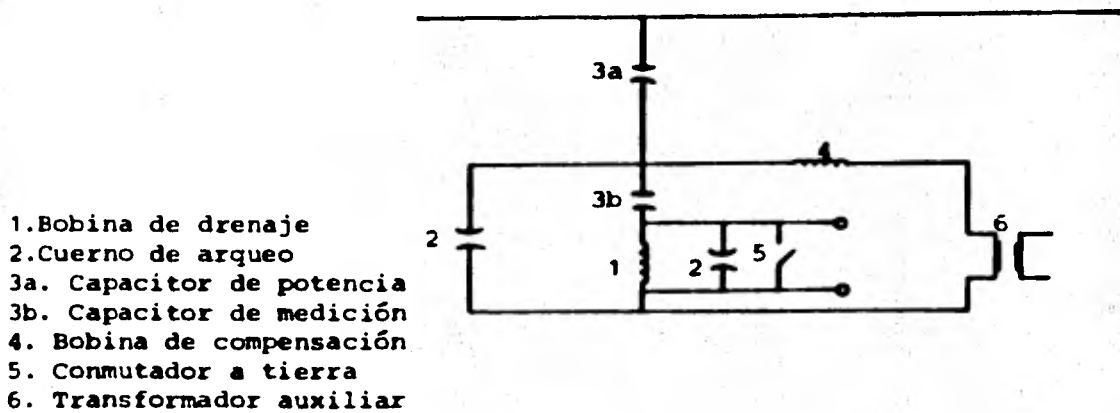


Figura 2.9

Por lo tanto, la ventaja derivada de utilizar un T.V.C. simultáneamente para propósitos de medición y acoplamiento de la señal de comunicación, consiste esencialmente en el ahorro de los capacitores de acoplamiento, mientras que su principal desventaja radica en que si es conectado atrás del conmutador de apertura de la línea, la comunicación será interrumpida.

#### 2.4.3 Trampa de Onda.

Una trampa de onda es un dispositivo utilizado para ofrecer una alta impedancia a las frecuencias de onda portadora y una baja impedancia a las señales de 60Hz.

Básicamente, la trampa de onda consiste en una bobina conectada en serie con la línea de transmisión, por lo que debe estar diseñada para soportar la corriente nominal de operación de la línea, así como, en el caso de fallas, deberá mostrar la misma resistencia a condiciones de corto circuito que el sistema de potencia. Es por ésto que el tamaño y costo de la trampa, están determinados por la capacidad de trabajo del sistema. La figura

2.10 muestra la forma en que es colocada la trampa de onda en la línea, mientras que la tabla 2.6 muestra las posibles corrientes a las que se encuentra sometida la trampa de onda.

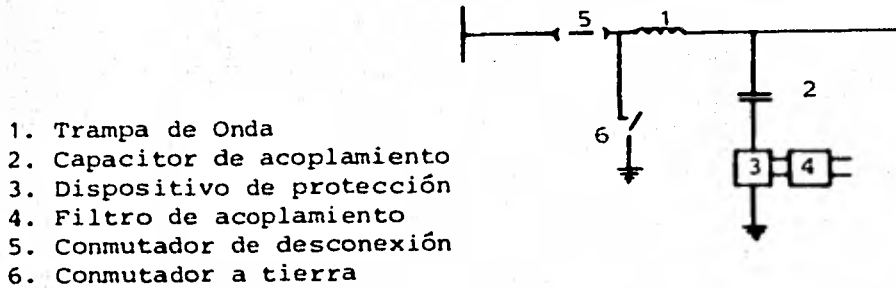


Figura 2.10

MINIMA CORRIENTE DE DISEÑO

AMPERES NOMINALES	CORRIENTE DE DISEÑO TERMICO PARA 2 SEG. (AMPERES SIMETRICOS RMS)	CORRIENTE DE DISEÑO MECANICO (AMPERES SIMETRICOS RMS)
400	15,000	15,000
800	20,000	20,000
1,200	36,000	35,000
1,800	44,000	44,000

Tabla 2.6

a) Impedancia de las trampas de onda:

La impedancia de las trampas de onda tiene la característica de minimizar las pérdidas de acoplamiento al presentar una impedancia muy alta a la señal de comunicación. Cuando se acopla un

sistema de OPLAT en una línea de transmisión, la onda portadora tiene dos posibles caminos: uno de ellos es propagarse a través de la línea hacia el capacitor de acoplamiento, y el otro hacia el bus de la estación a través de la trampa de onda. Reduciendo la pérdida de la componente de la señal que fluye hacia el bus, el nivel de la señal de portadora es aumentado en la trayectoria deseada, lográndose por tal motivo, una disminución en la interferencia causada a otras secciones del sistema, permitiendo por lo tanto, el reuso de las frecuencias de portadora en secciones alternas.

b) Sintonía:

En relación a las frecuencias manejadas, se puede hablar de trampas resonantes, las cuales bloquean uno o dos canales de portadora y con un valor de inductancia aproximado a 0.2mH, y de trampas de banda amplia, las cuales bloquean completamente, o en una gran porción el rango de frecuencias de portadora, presentando valores de inductancia mayores de 2mH. Este valor de inductancia determinará la capacidad de bloqueo de la trampa, incrementándose proporcionalmente ambas.

Una trampa resonante es un circuito resonante paralelo consistente principalmente de 1 bobina y de un paquete con capacitancia variable.

La trampa de onda resonante a una frecuencia requiere de un paquete el cual proporciona rangos de sintonía de 30 a 90KHz, de 50 a 150 KHz, y de 70 a 200 KHz, dependiendo este rango de los valores de capacitancia del paquete. Este contiene dos capacitores, los cuales pueden ser conectados en serie o bien en paralelo para seleccionar cualquiera de los rangos de frecuencia mencionados. Este tipo de trampas es mostrado en la figura 2.11.

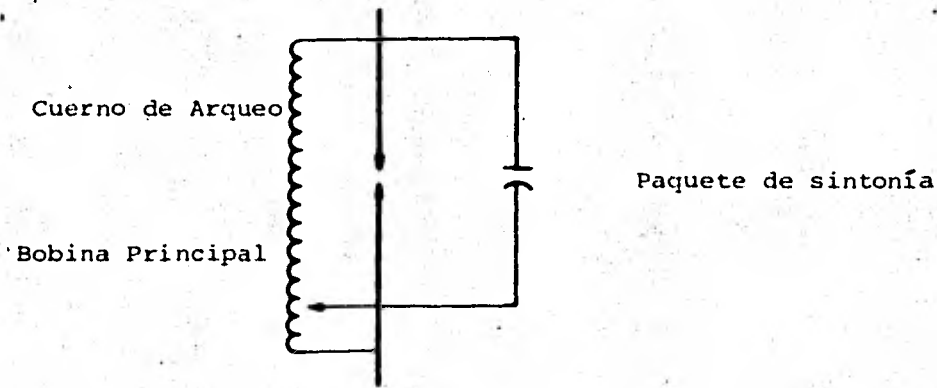


Figura 2.11

La trampa de onda resonante a 2 frecuencias requiere de dos paquetes adicionales para lograr el bloqueo, teniendo la configuración mostrada en la figura 2.12. La frecuencia más alta es sintonizada de la misma forma que una trampa de onda de una sola frecuencia, mientras que los elementos adicionales bloquean la segunda frecuencia.

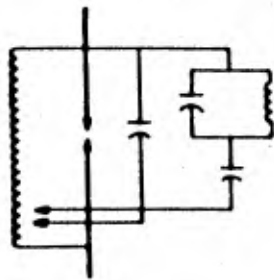


Figura 2.12

La necesidad de eliminar los capacitores variables, al ser éstos dañados por sobrevoltajes y condiciones climatológicas desfavorables para el equipo, llevó al diseño de trampas de banda am-

plia, las cuales se caracterizan por su valor elevado de inductancia, la cual es suficiente para tener un rango de bloqueo. Esta característica de gran bloqueo es debido a que la bobina principal junto con los demás elementos actúan como un filtro. Por tal motivo, se deben escoger cuidadosamente los parámetros que la constituyen para que la trampa elaborada pueda bloquear el máximo rango posible.

La forma de estas trampas es mostrada en la figura 2.13

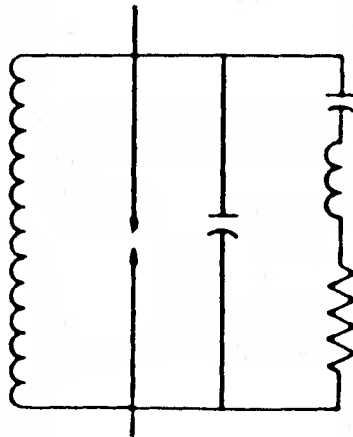


Figura 2.13

#### 2.4.4 Filtros de Acoplamiento.

Para lograr una mejor transferencia de la señal de comunicación desde la línea o hacia la misma y, simultáneamente, bloquear el paso de señales de 60Hz, se utilizan los filtros de acoplamiento que consisten en circuitos resonantes o en filtros.

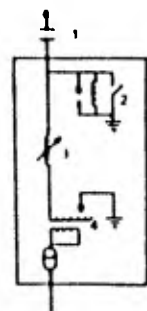
Los filtros de acoplamiento pueden ser de dos tipos: Filtros de acoplamiento resonantes y filtros de acoplamiento de banda amplia.

##### a) Filtros de acoplamiento resonantes:

Este tipo de unidades emplean elementos sintonizadores reactivos para producir resonancia en serie con la reactancia del capacitor de acoplamiento a una o más frecuencias. Dentro de este tipo de filtros existen dos clases : filtros de acoplamiento de una sola frecuencia y filtros de acoplamiento de dos frecuencias.

Las unidades de una sola frecuencia requieren de una sola bobina para producir la resonancia a la frecuencia deseada. Además la unidad también incluye una unidad de protección y un transformador de acoplamiento como se muestra en la figura (2.14).

A la línea de Transmisión



A la terminal de Onia Portadora

1. Capacitor de acoplamiento
2. Unidad de protección
3. Bobina de sintonía
4. Transformador de acoplamiento

Figura 2.14

Existen dos métodos mediante los cuales los filtros de acoplamiento pueden ser sintonizados a dos frecuencias como muestra la figura (2.15.a) y (2.15.b). El circuito de la figura (2.15.a) se utiliza cuando las dos frecuencias van a ser transmitidas por medio de cables coaxiales separados. Una trampa resonante se conecta en cada rama sintonizada, de tal manera que rechace la señal que pasa a través de la rama opuesta. La bobina en serie en cada rama se sintoniza para obtener la máxima corriente de la señal deseada. Esta unidad al igual que la anterior incluye una unidad de protección y un transformador de acoplamiento. El circuito de la figura (2.15.b), puede ser usado cuando se desean enviar las dos frecuencias a través del mismo cable coaxial. La bobina superior es sintonizada para que transfiera las dos frecuencias y rechace las frecuencias diferentes a éstas. La rama de la parte inferior que contiene un capacitor y una bobina, también se sintoniza a las dos frecuencias deseadas, y el propósito de la bobina que se encuentra en paralelo, es el de obtener la máxima corriente de la señal de frecuencia más baja.

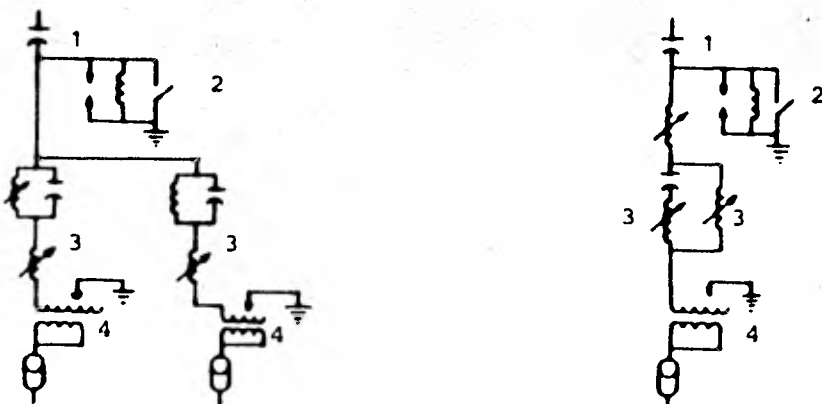


Figura 2.15



b) Filtros de acoplamiento de banda amplia:

Este tipo de filtros utilizan filtros más que circuitos resonantes para compensar la reactancia del capacitor de acoplamiento y son empleados cuando es necesario pasar una banda amplia de frecuencias. En este tipo de filtros de acoplamiento, el capacitor de acoplamiento sirve como un elemento del filtro, que usualmente es un arreglo de filtro paso-altas o paso-baja de constante K, como muestra la figura (2.16).

Las unidades mostradas en la figura, son capaces de sintonizar frecuencias desde los 50 hasta los 200 KHz de manera muy eficiente, usando capacitancia de acoplamiento de  $0.006\mu\text{f}$  o más.

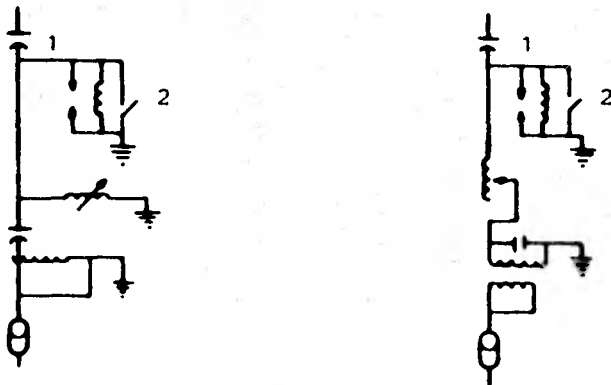


Figura 2.16

2.4.5 Circuitos de Puenteo.

Los circuitos de puenteo son utilizados en los sistemas OPLAT cuando se requiere que una señal de comunicación sea transferida alrededor de discontinuidades como pueden ser: interruptores abiertos, transformadores o líneas de diferentes voltajes, pu-

diendo involucrar el paso de uno o varios canales de comunicación.

Además, estos circuitos deben estar diseñados para no transferir voltajes peligrosos de la línea hacia secciones desconectadas.

El puenteo de señales se realiza de la siguiente manera: En las partes terminales de las discontinuidades se colocan capacitores de acoplamiento, los cuales se encuentran unidos en sus terminales de bajo voltaje por un equipo sintonizador que permitirá el paso de la señal de comunicación, tal como se muestra en la figura (2.17). Además, en el arreglo antes descrito, se utilizan trampas de onda para minimizar la fuga de las portadoras hacia secciones indeseables.

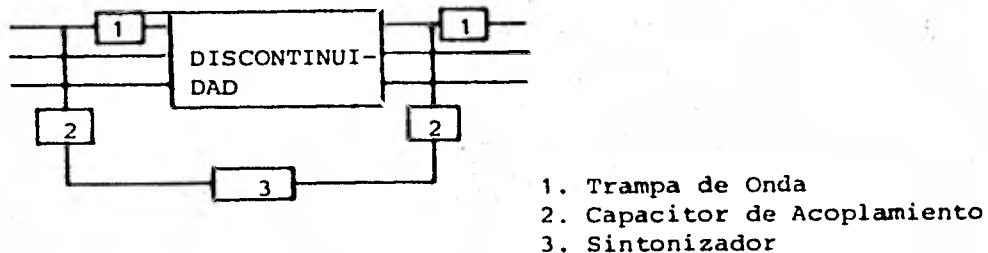


Figura 2.17

Dependiendo de la longitud existente entre los extremos de las discontinuidades, los circuitos de puenteo pueden ser: de puenteo corto, para longitudes menores a 30m, o de puenteo largo para distancias superiores a esta longitud.

a) Circuitos de puenteo corto :

En este tipo de circuitos, los arreglos más utilizados constan de un sintonizados que trabaja a la frecuencia de la portadora, pudiendo de esta manera existir una segunda comunicación.

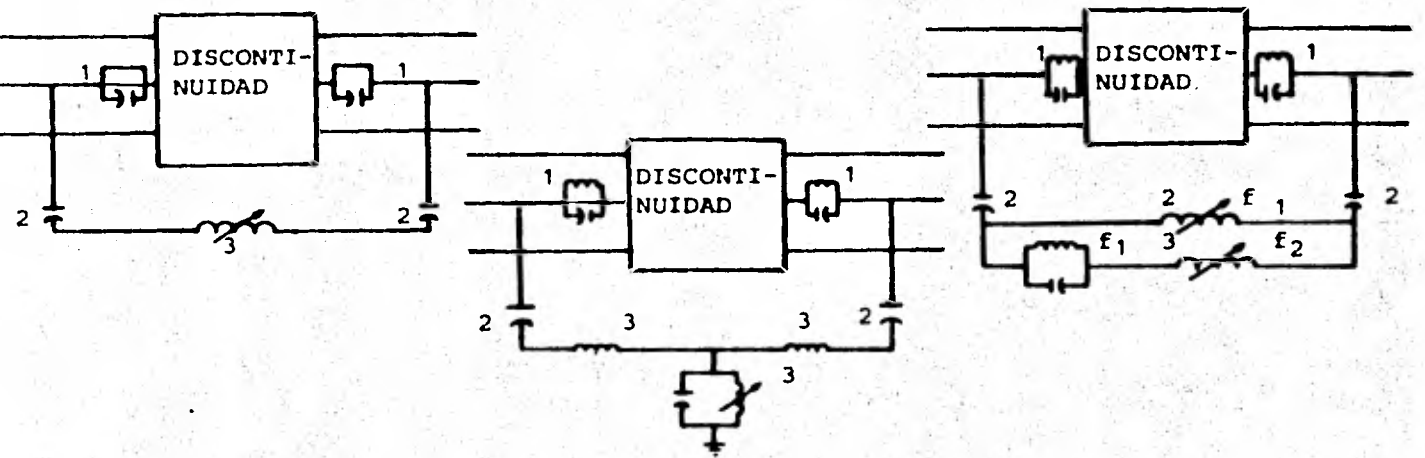


Figura 2.18

b) Circuitos de puenteo largo:

El arreglo más utilizado se muestra en la figura (2.19), en la cual un sintonizador se asocia a cada capacitor de acoplamiento utilizándose un cable coaxial como medio de enlace entre ellos. La distancia cubierta, dependerá también de las pérdidas del cable al trabajar a las frecuencias de portadora.

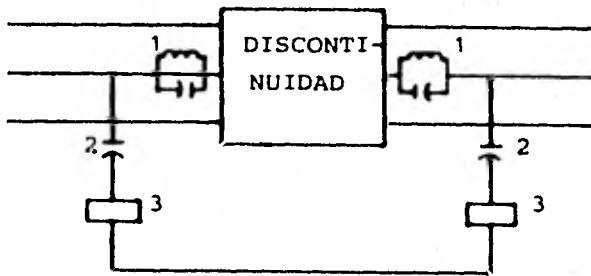


Figura 2.19

## 2.5 ANALISIS MODAL

El análisis modal es un procedimiento analítico que permite efectuar cálculos de atenuación en las líneas de transmisión y también de pérdidas por acoplamiento y transposiciones.

Al inyectarse una señal en un cable de una línea compuesta de varios conductores, se inducirá en los demás parte de la señal, dependiendo las características de propagación del número de conductores de la línea.

La idea de los modos de propagación presenta afinidades con la teoría de base vectoriales del álgebra lineal. Al acoplar una señal en uno o varios conductores de la línea, aquella puede describirse como una combinación lineal de modos, donde cada modo se caracteriza porque las corrientes que lo componen presentan la misma constante de atenuación.

Una línea de transmisión es un complejo circuito eléctrico, en el cual, acoplamientos capacitivos e inductivos ocurren entre las tres fases del sistema, así como entre éstas y tierra.

Debido a la complejidad de la línea, el cálculo de su atenuación y sus pérdidas utilizando el análisis modal requeriría la utilización de una computadora. Por tal motivo, y para fines de esta tesis, se pueden hacer una serie de suposiciones para poder realizar dicho cálculo de una manera más sencilla. Estas suposiciones son :

- a) La línea en estudio tiene 3 conductores de fase presentados en un arreglo horizontal.
- b) Las impedancias para las fases y modos son las mismas.

- c) La composición de los modos de corriente básicos, es independiente de la frecuencia.
- d) Las corrientes instantáneas de las tres fases están en fase ó  $180^\circ$  fuera de ella.

### 2.5.1 Modos Básicos.

Los principales modos que se obtienen al realizar las suposiciones descritas, son el modo 1 que presenta alta atenuación; el modo 2, con mediana atenuación y el modo 3, que presenta la menor atenuación de los tres modos.

En la figura (2.20), una señal ha sido acoplada en la fase central de la línea de transmisión. Debido al acoplamiento que existe entre fases se inducen corrientes defasadas  $180^\circ$  en las fases externas de la línea, alcanzando éstas, después de cierta distancia, la mitad del valor de la corriente acoplada en la fase central, conservándose después dichas magnitudes. A esta distribución de corrientes, que presenta la menor constante de atenuación se le conoce como modo 3\*.

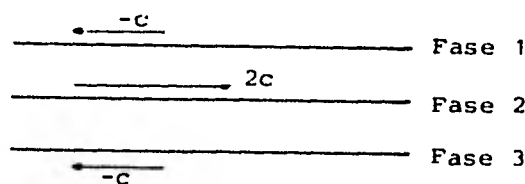


FIGURA (2.20)

\* Un análisis más real muestra que en este modo el valor de  $2c$  no se mantiene, teniendo un valor de  $(2+\delta)c$ , donde  $\delta$  tiene un valor aproximado de 0.08.

Existen otras dos distribuciones de corrientes básicas llamadas modo 1 y modo 2.

En el modo 1, las señales son introducidas simultáneamente en las 3 fases, presentando las mismas direcciones y magnitudes. El retorno de la señal se hace a través de tierra, y es debido a este hecho que este modo presente la más alta atenuación. La distribución de corrientes y su retorno pueden observarse en la figura (2.21).

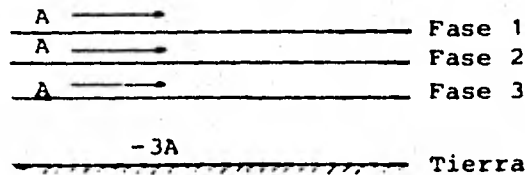


FIGURA 2.21

El modo 2, que presenta una mediana atenuación, consiste en la propagación de señales en las dos fases externas del sistema, como se muestra en la figura (2.22).

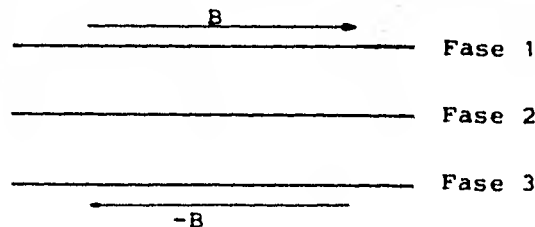


FIGURA 2.22

Cualquier distribución presentada por una señal de comunicación en una línea trifásica, puede ser representada por la combinación de estos 3 modos. La forma en que se pueden obtener los contenidos de cada componente modal es la siguiente :

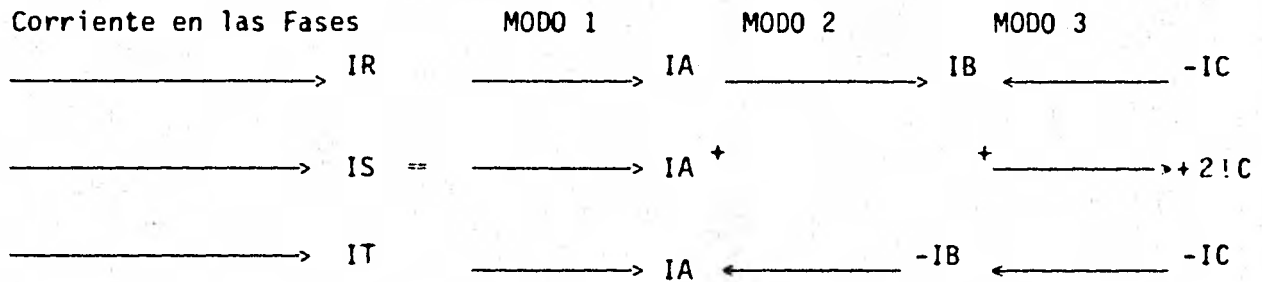


FIGURA 2.23

De esta distribución se obtiene :

$$IR = IA + IB - IC \quad (2.11)$$

$$IS = IA + 2IC \quad (2.12)$$

$$IT = IA - IB - IC \quad (2.13)$$

de (2.11) + (2.12) + (2.13), se tiene :

$$IA = \frac{1}{3} (IR+IS+IT) \quad (2.14)$$

De (2.12) + 2.14):

$$IC = \frac{1}{6} (2IS - IR - IT) \quad (2.15)$$

de (2.14) y (2.15) en (2.11) :

$$IB = \frac{1}{2} ( IR - IT) \quad (2.16)$$

### 2.5.2 Potencia en los Modos.

La potencia en las corrientes de los conductores de fase es igual a la suma de la potencia en los modos, suponiendo el mismo valor de resistencia para cada fase y cada modo.

### 2.5.3 Atenuación Modal.

La atenuación aproximada de los 3 modos básicos para una línea típica de 345KV, se muestra en la figura (2.24). Si se desea obtener la atenuación que se presentará en otras líneas, la tabla (2.7), da los factores por los que tendrá que multiplicarse los resultados obtenidos en la primera figura para diferentes tipos de líneas.

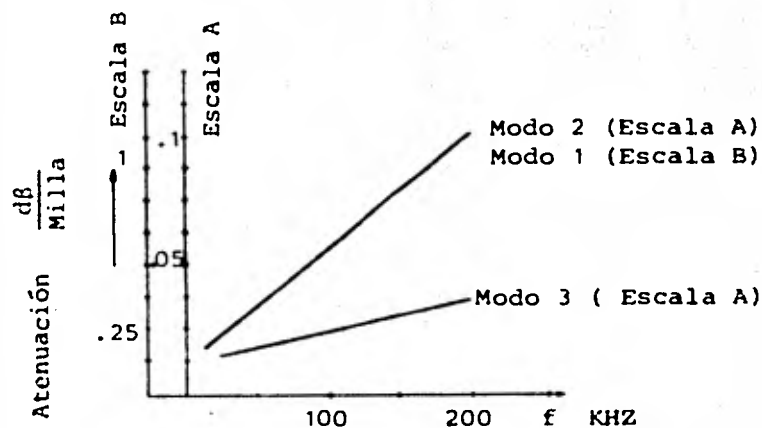


FIGURA 2.24



VOLTAJE DE LINEA (KV )	FACTOR DE MULTIPLICACION APLICADO EN LOS VALORES DE 345KV		
	MODO 1	MODO 2	MODO 3
138	1.5	1.4	1.4
230	1.3	1.2	1.1
345	1.0	1.0	1.0
500	1.0	1.0	0.8
765	1.0	1.0	0.7

TABLA 2.7

2.5.4 Pérdidas de Conversión

Debido a la gran atenuación que presentan el modo 1 y el modo 2 para distancias superiores a los 32km, las pérdidas por conversión se calculan en relación a la potencia transmitida y la potencia del modo 3, siendo éstas :

a) Pérdidas de conversión de fase central a tierra:

$$P_{\text{mod } 3} = \frac{2}{3} I^2 R \text{ - - - - - (2.17)}$$

$$P_{\text{Tot}} = I^2 R \text{ - - - - - (2.18)}$$

$$\text{Pérdidas } \text{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_{\text{tot}}}{P_{\text{mod } 3}} = 1.76 \text{ dB - - (2.19)}$$

Debido a que sufre las mismas pérdidas en el transmisor como en el receptor, las pérdidas totales de conversión serán :

$$\text{Pérdidas totales} = 3.52 \text{ dB}$$

b) Pérdidas de conversión de fase externa a tierra:

$$P_{\text{mod}3} = \frac{I^2 R}{6} \text{ - - - - - (2.20)}$$

$$P_{\text{tot}} = I^2 R \text{ - - - - - (2.21)}$$

$$\text{Pérdidas dB} = 2(10 \log_{10} \frac{P_{\text{t}}}{P_{\text{mod}3}}) = 15.56 \text{ dB - - - (2.22)}$$

c) Pérdidas de conversión de fase externa a central:

$$P_{\text{mod}3} = \frac{3}{2} I^2 R \text{ - - - - - (2.23)}$$

$$P_{\text{tot}} = 2I^2 R \text{ - - - - - (2.24)}$$

$$\text{Pérdidas dB} = 2(10 \log_{10} \frac{P_{\text{t}}}{P_{\text{mod}3}}) = 2.5 \text{ dB - - (2.25)}$$

d) Pérdidas de conversión del modo 3:

$$P_{\text{mod}3} = \frac{3}{2} I^2 R \text{ - - - - - (2.26)}$$

$$P_{\text{tot}} = \frac{3}{2} I^2 R \text{ - - - - - (2.27)}$$

$$\text{Pérdidas dB} = 2(10 \log_{10} \frac{P_{\text{tot}}}{P_{\text{mod}3}}) = 0 \text{ dB - - - - (2.28)}$$

2.5.5 Pérdidas por Transposición.

El análisis modal nos permite evaluar la atenuación introducida por una transposición, pues se considera la influencia de ésta, como un cambio en los modos de propagación.

## 2.6 EQUIPOS TERMINALES

La función de los equipos terminales en el sistema OPLAT consiste en acondicionar la información que se quiere transmitir con el objeto de que pueda ser enviada a través de la línea de alta tensión. Se encuentran formados por los transmisores y receptores de comunicación, los cuales operan a potencias que van de 1 hasta 100W, fabricándose en la actualidad equipos de 10, 20, 40 y 100W. Respecto a la impedancia del equipo, ésta varía, dependiendo del fabricante, presentando por lo general valores de 50, 75 y 150  $\Omega$ . Estos equipos tienen diferentes anchos de banda, dependiendo éstos de la información a manejarse, pudiendo tener valores de 1.5, 2.5, 4 y 5 Hz.

Por otro lado, para poder transmitir la señal de comunicación, estos equipos utilizan principalmente los siguientes tipos de modulación.

### 2.6.1 Modulación en Amplitud (A.M.).

A.M. se obtiene variando la amplitud de una onda portadora de frecuencia constante en proporción a la amplitud de una onda moduladora, tal como una señal de voz o un tono. El espectro de frecuencia resultante contiene la frecuencia de la portadora  $f_c$ , y dos bandas laterales localizadas a  $f_c + f_n$  y  $f_c - f_n$ ; donde  $f_n$  es la frecuencia de la señal moduladora.

Es por esto que el ancho de banda de una señal modulada en amplitud es dos veces el ancho de banda de la señal moduladora correspondiente.

Debido al ancho de banda requerido y su susceptibilidad al ruido, este tipo de modulación actualmente no es muy utilizado en los canales de voz por las compañías suministradoras.

### 2.6.2 Banda Lateral Unica (SSB).

Este tipo de modulación es AM, con una banda lateral suprimida, usualmente por medio de filtros. Cabe decir que esta modulación es la más utilizada en los modernos sistemas de OPLAT, ya que presenta más ventajas para el sistema, debido principalmente a tres razones. Primero: el ancho de banda utilizado es únicamente la mitad del utilizado en A.M., lo cual conduce a un mejor aprovechamiento del espectro de frecuencia; segundo: para un determinado transmisor, casi toda la potencia puede ser transmitida y no únicamente un cuarto como sucede en sistemas de A.M.; finalmente: esta modulación casi no está sujeta a efectos de ruido corona, debido a que al tener menor ancho de banda, se tiene una menor infiltración de este tipo de ruido, y además permite la concentración de la potencia de transmisión disponible para las múltiples señales de comunicación.

### 2.6.3 Frecuencia Modulada (FM).

Esta modulación resulta al variar la frecuencia de una portadora de amplitud constante en proporción a la amplitud de la señal moduladora. Una señal de FM puede contener muchas bandas laterales en igual cantidad, tanto arriba como abajo de la frecuencia portadora, separadas de la frecuencia portadora a una distancia de  $f_m$ ,  $2f_m$ ,  $3f_m$ , etc., siendo  $f_m$  la frecuencia de la señal moduladora.

Este método se emplea en líneas que operan con niveles altos de ruido, debido a la característica que tienen de presentar baja susceptibilidad a este fenómeno

### 2.6.4 Llaveo por corrimiento de frecuencia (FSK).

Este es un método por el cual se transmite una portadora confi-

nua con la característica de poder variar su frecuencia en función del tipo de señal a transmitir.

Comercialmente se encuentran equipos con corrimiento de dos a tres frecuencias, los cuales pueden realizar una o dos funciones respectivamente.

FSK se adapta principalmente para teleprotección, telemetría y transmisión de datos.

## 2.7 ESPECTRO Y ASIGNACION DE FRECUENCIAS

Los límites del rango de frecuencias de trabajo del sistema OPLAT, 30 KHz el límite inferior y 500 KHz el superior, se encuentran determinados por los siguientes factores. El límite inferior lo fijan las consideraciones técnicas y económicas asociadas con los circuitos de acoplamiento, mientras que el límite superior lo fija principalmente la atenuación que sufre la señal de comunicación a altas frecuencias.

Debido al limitado rango de frecuencias disponibles, es de vital importancia buscar la óptima utilización del espectro asignado al sistema OPLAT. Esto puede ser logrado al hacer una eficiente planeación de la distribución de los canales de comunicación, así como el de evitar interferencias entre diferentes sistemas OPLAT. Por lo tanto, cuando se está planeando la instalación de este tipo de sistemas, es muy importante escoger uno que requiera el mínimo ancho de banda posible para lograr cubrir sus necesidades, pues de esta manera se tendrá un mayor espectro a utilizar para la implantación de otros sistemas.

Los canales de comunicación existentes en los sistemas OPLAT, pueden tener un ancho de banda de 2.5, 4 y 6 KHz, dependiendo de su valor del equipo de comunicación empleado.

De acuerdo a la selección de alguno de estos tipos de canal, se podrá tener diferentes esquemas de asignación de frecuencias, recomendándose utilizar en la implantación de un sistema, canales del mismo ancho de banda con el objeto de realizar una mejor asignación.

Asimismo, para poder seleccionar el tipo de canal a utilizar, es importante tomar en cuenta lo siguiente :

- a) Topología de la red de alta tensión incluyendo longitudes de línea y situación geográfica.
- b) Voltaje de Operación
- c) Topología de la red de comunicación actual, así como de la que se planea instalar.
- d) Tipos de acoplamiento.
- e) Características del equipo de acoplamiento y de las trampas de onda.
- f) Características presentadas por la línea de alta tensión a la transmisión de ondas portadoras, dentro del rango de 30 a 500 KHz.
- g) Características de entrada y salida de los equipos de transmisión-recepción ya instalados o por instalar, tales como :
  - i) Selectividad y sensibilidad de los receptores.
  - ii) Características de los filtros de salida de los transmisores.
  - iii) Relación señal a ruido mínimo que se requiere para la operación de cada función (servicio) en un canal.
  - iv) Potencia de salida de los equipos y distribución de la misma por canal, y por servicio para los equipos ya instalados.
  - v) Ancho de la banda de los equipos.

- h) Atenuación de paso a través de barras colectoras en la subestación.
- i) Situación geográfica y frecuencia de operación de los radio faros y radio ayudas a la navegación aérea y marítima cercanas a la línea de transmisión.



## 2.8 APLICACIONES DEL SISTEMA OPLAT.

En el sistema OPLAT, debido al ancho de banda disponible, es posible utilizar las siguientes funciones :

- a) Transmisión de voz. Para este tipo de transmisión las señales de voz son generalmente moduladas en BLU y pueden ser enviadas en canales con un ancho de banda de 2.5 ó 4 KHz.

Los servicios que proporciona la transmisión de voz son, entre otros :

- . Despacho
- . Mantenimiento
- . Supervisión

- b) Datos. En los canales dedicados a la transmisión de datos a baja velocidad, se requiere un ancho de banda menor que el necesario para canales dedicados a voz ( 120Hz, 240Hz, 480Hz).

Cuando se transmiten datos en canales de voz, que es la práctica más frecuente, se utilizan los llamados MODEMS ( MODuladores -DEModuladores ), para llevar a cabo dicha transmisión, en la misma forma que en la línea telefónica.

Los servicios proporcionados mediante la transmisión de datos, son los siguientes :

- . Teleimpresión
- . Telemedición
- . Control supervisorio

- . Alarmas remotas
- . Control automático de generación

c) Teleprotección. Para el caso de esta función, las señales de teleprotección son generalmente moduladas en FSK y posteriormente son enviadas en BLU. Las señales de teleprotección son transmitidas en canales con un ancho de banda de 4 KHz, llamados canales dedicados; otra alternativa es enviar estas señales en los llamados canales compartidos, los cuales contienen señales de voz y teleprotección.

Los esquemas utilizables de teleprotección son :

- . Teleprotección por comparación de fase.
- . Teleprotección por disparo transferido.

## 2.9 VENTAJAS Y DESVENTAJAS QUE PRESENTA EL SISTEMA OPLAT.

Una vez analizadas las características del sistema OPLAT, se mencionan una serie de ventajas y desventajas que aporta la utilización de este sistema en las líneas de transmisión pertenecientes a los sistemas de potencia.

Entre las principales ventajas que presenta se tienen :

- Una alta confiabilidad debida a la robustez de la línea, lo que asegura la transmisión de las señales de comunicación.
- Un bajo costo asociado para satisfacer una mediana demanda de canales.
- Una alta economía cuando se requieren cubrir grandes distancias, debido a que no se requieren repetidoras; situación que no sucede con otros medios de comunicación.
- Un bajo costo de mantenimiento, gracias a que los equipos terminales se encuentran confinados en las terminales de la línea, y por lo tanto, son fácilmente accesibles.

Por otra parte, entre las desventajas que involucran la utilización de este sistema, se tienen :

- El limitado ancho de banda permisible.
- Problemas con la reasignación de frecuencias, debidas

a la inducción de la señal de comunicación en secciones de línea adyacentes.

- El aumento en el costo del equipo de acoplamiento y disminución del rango de frecuencias aprovechable, ocasionados por el aumento de la tensión de la línea.

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

L I B R O S :

1. JOHNSON, Transmission Lines and Networks 2d ed. McGraw Hill, Kogakusha. 1950.
2. PODSZECK. Carrier Communication over Power Lines, 4th ed. Springer - Verlag, 1972.
3. WESTINGHOUSE E. CORP., Electrical Transmission and Distribution, Reference Book, 1951.

A R T I C U L O S :

4. AIEE COMMITTEE REPORT - Guide to Application and Treatment of Channels for Power Line Carrier, AIEE Trans. 1954.
5. BARTLEY, Simplified Modal Analysis.- General Electric Power Systems Communication, 1973.
6. CIGRE - Study Committee 35, Guide on PLC, 1978,
7. GERENCIA GENERAL DE OPERACION - Comunicaciones a través de OPLAT. CFE - 1976.
8. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - Technical Committee No. 57 - PLC Systems and Telecontrol Equipment. 1978.
9. FIEDLER, PLC Its uses in Power Systems - General Electric Power Systems Communications, 1973.

10. GENERAL ELECTRIC - Coupling Capacitors - General Electric, Power Systems Communications, 1973.
11. IEEE - Guide for Power Line Applications - IEEE 1975.
12. IIE - Reporte Final de Hilo de Guarda Aislado, 1979.
13. SWINGLE - DOBSON - P.L.C. Systems, Chap. 14, Hamsher Communications Systems Handbook.
14. TOVAR MARTINEZ, CABEZA J. - Consideraciones para la Utilización Racional del Espectro en los Sistemas de OPLAT. IIE. 1979.

## LISTA DE FIGURAS Y TABLAS DEL CAPITULO II

### I. FIGURAS.

- 2.1 Diagrama de un sistema OPLAT<sup>(9)</sup>
- 2.2 Atenuación característica del sistema OPLAT<sup>(2)</sup>
- 2.3 Acoplamiento de Modo 3<sup>(11)</sup>
- 2.4 Acoplamiento de fase central a tierra<sup>(11)</sup>
- 2.5 Acoplamiento de fase externa a tierra<sup>(11)</sup>
- 2.6 Acoplamiento de fase central a fase externa<sup>(11)</sup>
- 2.7 Acoplamiento entre-circuitos<sup>(11)</sup>
- 2.8 Capacitor de acoplamiento<sup>(10)</sup>
- 2.9 Transformador de voltaje capacitivo<sup>(2)</sup>
- 2.10 Trampa de onda en la línea de alta tensión<sup>(2)</sup>
- 2.11 Trampa de onda resonante a una frecuencia<sup>(11)</sup>
- 2.12 Trampa de onda resonante a dos frecuencias<sup>(11)</sup>
- 2.13 Trampa de banda amplia<sup>(13)</sup>
- 2.14 Filtro de acoplamiento resonante para una
- 2.15 Filtros de acoplamiento de dos frecuencias<sup>(13)</sup>
- 2.16 Filtros de acoplamiento de banda amplia<sup>(13)</sup>
- 2.17 Circuito básico de puenteo
- 2.18 Circuitos de puenteo corto<sup>(11)</sup>
- 2.19 Circuitos de puenteo largo<sup>(12)</sup>
- 2.20 Modo 3<sup>(5)</sup>
- 2.21 Modo 1<sup>(5)</sup>
- 2.22 Modo 2<sup>(5)</sup>
- 2.23 Representación de corrientes por medio de modos de propagación<sup>(5)</sup>
- 2.24 Atenuación Modal<sup>(5)</sup>

## II. T A B L A S.

- 2.1 Impedancia característica en líneas de un solo conductor por fase<sup>(2)</sup>
- 2.2 Pérdidas en cable coaxial<sup>(12)</sup>
- 2.3 Atenuación en líneas de transmisión de alto voltaje<sup>(12)</sup>
- 2.4 Niveles típicos de ruido corona referidos a un ancho de banda de 4KHz<sup>(6)</sup>
- 2.5 Niveles típicos de ruido corona referidos a un ancho de banda de 2.5 KHz<sup>(2)</sup>
- 2.6 Corriente mínima de diseño<sup>(4)</sup>
- 2.7 Factores de conversión de voltaje de línea para atenuación modal<sup>(5)</sup>



C A P I T U L O

I I I

DESCRIPCION DEL SISTEMA OPSA Y SUS PRINCIPALES  
CARACTERISTICAS

## I N D I C E

	<u>PAGINA</u>
3.1 INTRODUCCION	3-III
3.2 CARACTERISTICAS GENERALES DEL SISTEMA OPSA	5-III
3.3 DESCRIPCION DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA OPSA	7-III
3.4 CAMPOS DE INDUCCION Y RADIACION	19-III
3.5 ATENUACION E IMPEDANCIA CARACTERISTICAS	28-III
3.6 ANCHO DE BANDA	32-III
3.7 DIAFONIA	39-III
3.8 EFECTO CORONA	44-III
3.9 CONDICIONES DE FALLA	48-III
3.10 APLICACIONES	54-III

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

La tendencia hacia el empleo de tensiones cada vez más altas en líneas de transmisión para satisfacer la creciente demanda de energía, hizo posible concebir la utilización de líneas trifásicas, compuestas por varios conductores por fase, llamados subconductores, encontrándose éstos separados entre sí por pequeñas distancias, comparadas con la distancia existente entre las fases del sistema.

La utilización de este tipo de líneas como medio de transmisión de energía en los sistemas de potencia, trae consigo una serie de ventajas sobre las líneas trifásicas convencionales ( con un solo conductor por fase), debidas principalmente al mencionado espaciamiento que existe entre los subconductores, lo cual ocasiona un aumento del radio medio geométrico (RMG) de la fase. Entre las principales ventajas se pueden mencionar : la disminución de la reactancia de la línea, lo que ocasionaría una disminución en las pérdidas de energía; la disminución del gradiente de voltaje, que trae como consecuencia, menores pérdidas por efecto corona y la disminución de la radio interferencia.

Por otra parte, debido a la importancia que la continuidad en el suministro de energía tiene, éste debe hacerse lo más eficiente y económico posible. De ahí que, para la supervisión y control del mismo, la demanda de canales de comunicación, en las líneas de transmisión de alto voltaje, ha aumentado, no pudiendo ser suministrados estos canales por los sistemas OPLAT debido al limitado rango de frecuencia que presentan. Como consecuencia, se ha mostrado un gran interés en la investigación de los problemas asociados con una mejor utilización de las líneas de alta tensión, para propósitos de comunicación, surgiendo recientemente

el empleo de subconductores aislados de una misma fase como posible solución al problema.

El método de onda portadora por subconductores aislados (OPSA) fué propuesto tempranamente por N.A. Ulganousky y K.V. Schumatski<sup>(11)</sup> en el año de 1951, habiendo sido patentado por E. Schulz y W. Vogl<sup>(9)</sup> en el año de 1956. Posteriormente en 1964, las publicaciones hechas por Fleischhaver, Podszeck y Vogl<sup>(2)</sup> abrieron las puertas al estudio de este método de comunicación. En el año de 1978, Lautensach, Martin, Nocker y Schumm presentaron en la sesión del CIGRE ( Conference Internationale de Grands Reseaux Electriques) un artículo en el que detallan la implantación del sistema a una línea de 380KV, con una longitud de 31Km<sup>(3)</sup> y posteriormente, en el año de 1979, V.H. Ishkin presentó ante el mismo organismo los trabajos realizados en la URSS para la implantación de este método a los hilos de guarda dobles de líneas de 1150 KV<sup>(8)</sup>. Los resultados que estas publicaciones ofrecieron, comprobaron la posibilidad de utilizar OPSA como una alternativa para la satisfacción de la demanda limitada de canales, así como la existencia de otras ventajas que serán tratadas posteriormente.

### 3.2 CARACTERISTICAS GENERALES DEL SISTEMA OPSA

Desde un punto de vista de comunicaciones, un sistema de onda portadora por subconductores aislados, puede ser definido como aquel en el cual la transmisión de señales de comunicación, se realiza a través de los subconductores de una misma fase, formando éstos un par balanceado al encontrarse debidamente aislados entre sí.

Básicamente, los elementos que componen un sistema OPSA son los siguientes : (Ver Fig. 3.1).

- . Equipo transmisor-receptor
- . Sintonizadores de línea
- . Capacitores de acoplamiento
- . Trampas de onda
- . Espaciadores aislantes
- . Ensamblés de suspensión

Los cuatro primeros elementos indicados, son los mismos que los utilizados en los sistemas OPLAT convencionales; aunque cabe aclarar que existen algunas variantes en las trampas de onda que pueden ser aplicables en estos sistemas. Dichas variantes, junto con las características más relevantes de los espaciadores aislantes y ensamblés de suspensión, se describen a continuación :

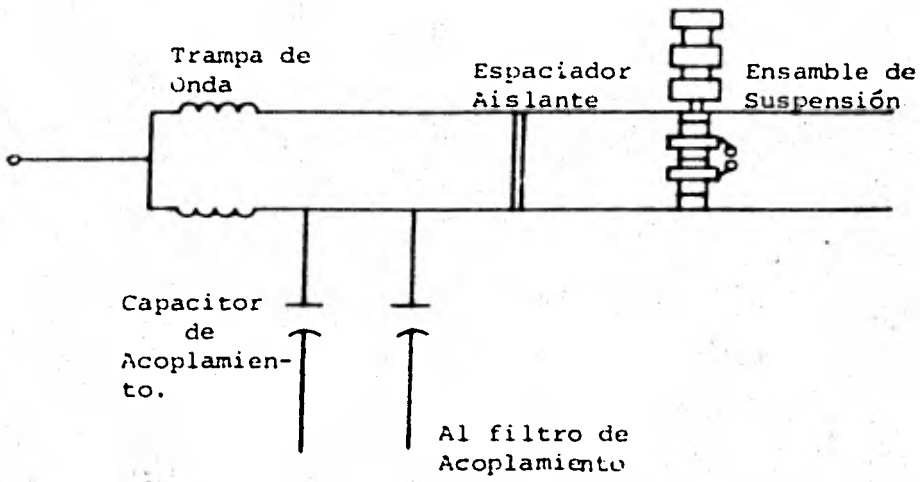


Figura 3.7

### 3.3 DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA OPSA

#### 3.3.1 Espaciadores Aislantes

Al considerar las líneas de subconductores como un medio de comunicación, se debe tener presente que su principal tarea, consistente en la transmisión de energía, no se altere. Por lo tanto, los espaciadores aislantes deben primero cumplir con los requerimientos impuestos por la línea de transmisión al voltaje de operación.

Para ésto, deben estar diseñados con una adecuada resistencia mecánica capaz de soportar, en condiciones de falla de la línea, los esfuerzos de tensión y compresión generados; así como, bajo condiciones de operación normales, mantener el espaciamiento adecuado entre los subconductores de la fase.

Por otro lado, como parte del sistema de comunicación, los espaciadores deben tener una mínima influencia sobre las características de la línea al trabajar a altas frecuencias.

#### a) Requerimientos de los espaciadores. (12)

Los principales requerimientos que debe cubrir un espaciador, sea aislante o no, son los siguientes :

- Evitar los contactos entre los subconductores, debido a que al ocurrir, pueden éstos sufrir daños por abrasión y deformación. Estudios han mostrado que para prevenir contactos para condiciones de corto circuito\*, se deben colocar espaciadores a distancias aproximadas de 1m. a lo largo de la línea. Esta solución no es económicamen-

\* Comunicaciones Por línea de Alta Tensión. Simposium de Siemens, MEXICO, Marzo de 1980.

te factible, debido al alto número de espaciadores utilizados (comunmente la distancia entre los espaciadores fluctúa entre los 30 y 60 m.)<sup>(14)</sup>.

- Mantener un adecuado espaciamiento entre los subconductores en condiciones normales de operación sin sufrir una distorsión permanente.
- Al generarse una corriente de corto circuito en la línea, los espaciadores deberán ser capaces de soportar el impacto que ocurre en los subconductores al entrar en contacto entre sí, debido a las fuerzas de atracción, originadas por esta corriente.
- También, los espaciadores deberán tener la suficiente resistencia mecánica para soportar las fuerzas resultantes debidas a la acción del viento, a sobrepesos producidos por acumulación no uniforme de hielo sobre los conductores individuales, a movimientos relativos entre éstos, y a efectos debidos al fenómeno de corona.
- Los espaciadores deben ser diseñados en forma tal que puedan prevenir los movimientos relativos de los conductores de una fase, dado que este movimiento entre partes metálicas puede ocasionar desgastes y aflojamientos en el espaciador, así como una posible fuente de generación de radio interferencia.
- Se sugiere que<sup>(12)</sup> eléctricamente, para encontrarse libres de efecto corona, los espaciadores deberán ser diseñados para soportar un gradiente de voltaje con un valor del 5% mayor del específico para la línea.



- Para propósitos de comunicación, los espaciadores aislantes deben ser diseñados<sup>(1)</sup> para tener un valor bajo de capacitancia ( aproximadamente 0.2 pF) y grandes valores de resistencia a las corrientes de fuga ( del orden de  $10^7 \Omega$  ) para minimizar su influencia sobre las características de la línea a radio frecuencias.

b) Tipos de espaciadores.<sup>(1)</sup>

Existen dos principales tipos de espaciadores aislantes :

- . El primero de ellos, para dos subconductores, consiste en una barra de resina epóxica con discos metálicos provistos con una cubierta de neopreno conductor, encontrándose atornillada en los extremos de la barra. Los espaciadores son conectados con los subconductores por medio de espirales metálicas preformadas (Fig.3.2).
- . El segundo tipo de espaciadores está formado por dos secciones metálicas unidas por medio de un aislante como lo muestra la figura 3.3. Son diseñados de tal manera debido a que los máximos esfuerzos mecánicos ocurren en, o cerca de, la unión del subconductor y el espaciador.

La selección de un espaciador aislante debe ser tal que este dispositivo llene todos los requisitos anteriormente mencionados, de tal forma que su utilización no interfiera tanto en la transmisión de energía como en las señales de comunicación.

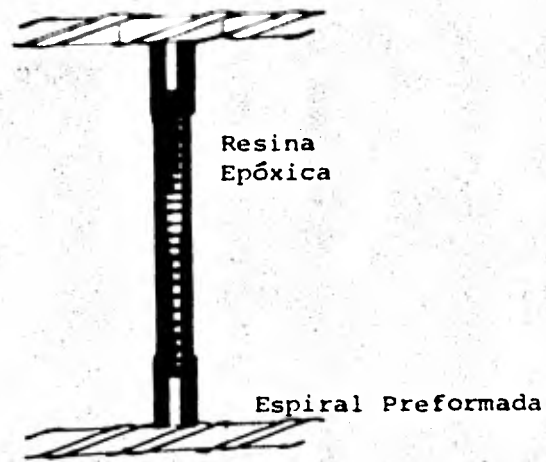


Figura 3.2

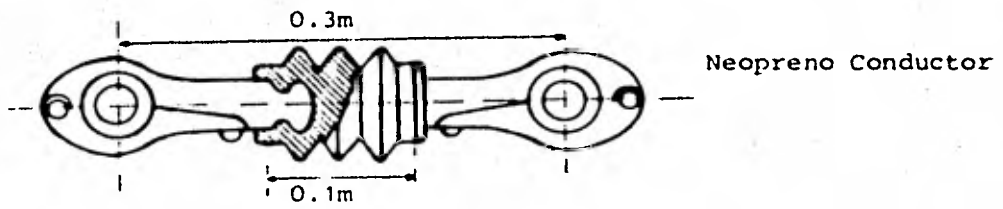


Figura 3.3

### 3.3.2 Trampas de Onda<sup>(13,2,5)</sup>

Las trampas de onda convencionales son diseñadas para soportar tanto la corriente nominal de la línea como las corrientes de corto circuito que puedan generarse en condiciones de falla, teniendo por tal motivo un gran tamaño y un elevado precio. En los sistemas OPSA, es posible utilizar, además de este tipo de trampas, un arreglo que realiza la misma función de bloqueo. A continuación se describirá el funcionamiento de ambos dispositivos en los sistemas OPSA.

#### a) Trampas de onda convencionales

Al utilizar trampas de onda convencionales, el bloqueo de la señal de comunicación se realiza colocando una trampa en cada subconductor en los extremos de la línea, tal como lo muestra la Fig. (3.4).

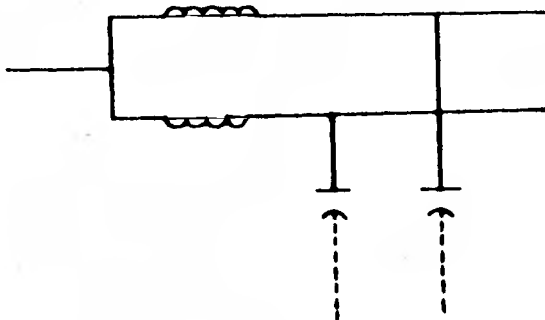


Figura 3.4

Asimismo, este bloqueo también se puede realizar al utilizar una sola trampa de onda de banda amplia en los puntos de bloqueo, en vez de dos. Para ésto, la señal de 60 Hz que lleva cada subconductor entra a la trampa de onda en las terminales del embobinado fluyendo hacia la estación a través del tap central. (Fig.3.5)

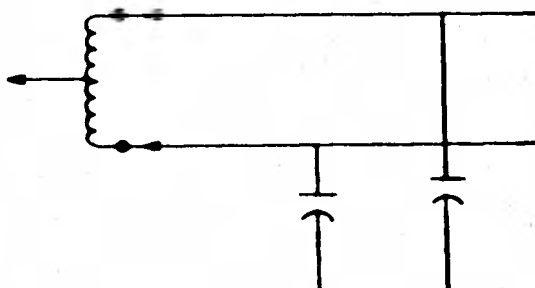


Figura 3.5

b) Trampa de un cuarto de longitud de onda ( $\lambda/4$ )

Otra alternativa, es utilizar un arreglo basado en la teoría de las líneas de transmisión con una longitud de un cuarto de onda ( $\lambda/4$ ), las cuales, cuando son terminadas en corto circuito, presentan una impedancia infinita de entrada. Basados en este prin-

cipio, los sistemas OPSA permiten la utilización de las llamadas trampas de un cuarto de longitud de onda, mostradas en la figura 3.6, en donde  $\lambda/4$  es la distancia del punto de inyección de la señal de comunicación al de unión de los subconductores, lográndose este último mediante el uso de separadores metálicos o con remate normal de la línea en la subestación.

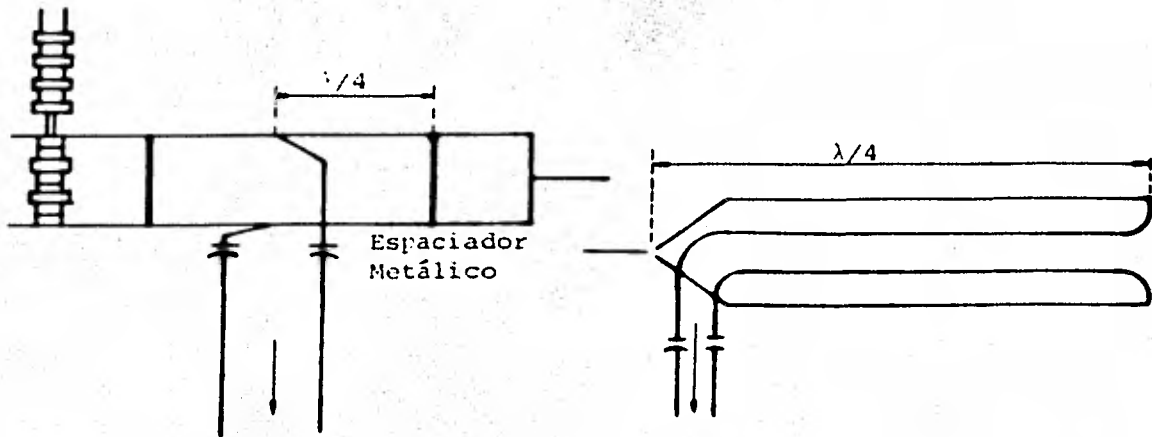


Figura 3.6

Teóricamente la impedancia  $Z_1$ , que presenta una línea de transmisión de longitud  $l$ , terminada en corto circuito es :

$$Z_1 = jZ_0 \tan \beta l \text{ - - - - - (3.1)}$$

donde  $Z_0$  es la impedancia característica de la línea.

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \text{cte. de fase}$$

$\lambda$  = Longitud de onda de la señal utilizada

Por lo tanto, la ecuación (3.1) se puede expresar como :

$$Zl = JZ_0 \tan \frac{2\pi l}{\lambda} \text{ - - - - - (3.2)}$$

La impedancia tendrá un valor infinito cuando la  $\tan \frac{2\pi l}{\lambda}$  sea infinita.

Como sabemos, la tangente tiene un valor infinito para ángulos  $\frac{\pi}{2}$ ,  $\frac{3\pi}{2}$ ,  $\frac{5\pi}{2}$ , etc. Por lo tanto, para una impedancia infinita  $\frac{2\pi l}{\lambda} = \frac{\pi}{2} = \frac{3\pi}{2} = \frac{5\pi}{2}$ , etc.

Para  $\frac{\pi}{2}$  se tiene  $\frac{2\pi l}{\lambda} = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \frac{l}{\lambda} = \frac{1}{4} \Rightarrow l = \frac{\lambda}{4}$

Así pues, se demuestra que a valores de  $l = \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4}$  se tiene  $Z = \infty$

La frecuencia a la cual ocurre esta impedancia se llama frecuencia central ( $f_0$ ). Por otra parte, la impedancia de entrada para el acoplamiento, es una línea de transmisión en corto circuito en paralelo con la impedancia característica de la línea ( $Z_0$ ), resultando :

$$Z_{in} = \frac{(Z_0) (JZ_0 \tan \beta l)}{Z_0 + JZ_0 \tan \beta l} \text{ - - - - - (3.3)}$$

Estas trampas tienen un rango de acoplamiento de  $\frac{\lambda}{8}$  a  $\frac{3\lambda}{8}$ , en donde la impedancia de la trampa es igual o mayor que la impedancia de la línea. Por ejemplo para un rango de frecuencias de

1 MHz\*, la distancia entre el punto de inyección y el de corto circuito será la cuarta parte de la longitud de onda de la señal, siendo en este caso  $l = 300/4 = 75\text{m}$ .

La ventaja de este método es que la distancia  $\lambda/4$  puede ser variada convenientemente con solo mover un espaciador metálico, además de la economía que este dispositivo presenta

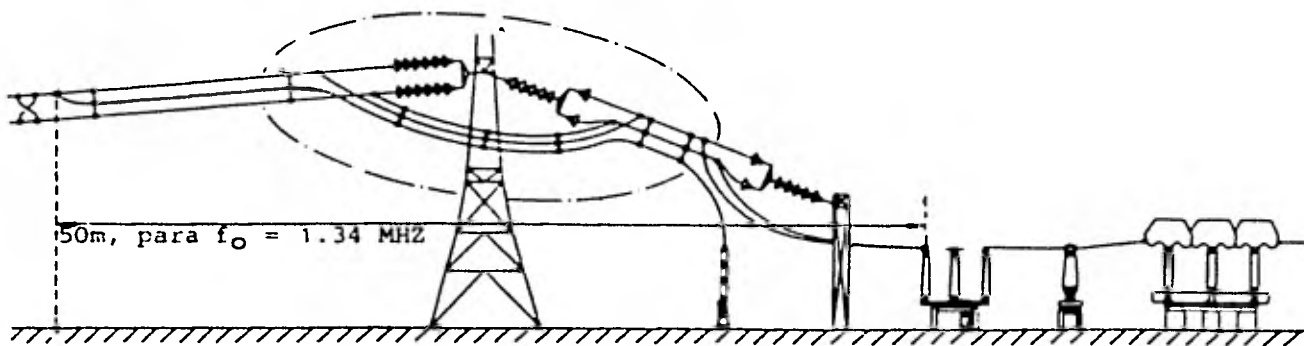


Figura 3.7

---

\* Ver Sección 3.6

Los dos últimos dispositivos descritos en esta sección ( trampa con tap central y trampa de  $\lambda/4$ ), resultan ser más económicos que los utilizados en sistemas convencionales OPLAT que empleen más de una fase para el bloqueo debido a que; en el caso de la trampa con tap central, bajo condiciones normales de operación, únicamente soporta la mitad de corriente de línea ( para el caso de dos subconductores), lo cual facilita su construcción. Para el caso de trampa  $\lambda/4$ , ésta solamente requiere de el tendido de los cables que lleven la señal de comunicación desde el punto de inyección de la señal al equipo de comunicación, dando un gran ahorro en equipo.

### 3.3.3 Ensamblés de Suspensión<sup>(1,2)</sup>

Los ensambles de suspensión están unidos a las torres de las líneas a través de las cadenas de aisladores y tienen la función de sujetar los subconductores de la línea. Estos al igual que los espaciadores aislantes, deben estar diseñados para soportar las fuerzas de origen eléctrico y mecánico a las que se encuentran sometidos bajo cualquier condición de carga, así como asegurar una adecuada transmisión de la señal de comunicación.

Bajo condiciones normales de operación, los ensambles de suspensión deben soportar fuerzas de tensión originadas por el peso propio de los subconductores, así como la fuerza axial originada por la carga del viento. Por tal motivo, algunos ensambles se encuentran provistos de una articulación que permite movimientos relativos entre la cadena de aislamiento y el propio ensamble, tal como lo muestra la figura 3.8.

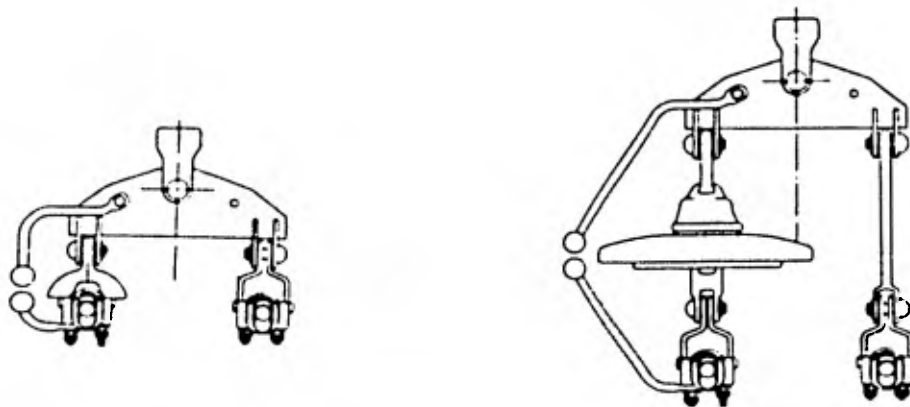
Para propósitos de comunicación los ensambles deben presentar una pequeña capacitancia entre los subconductores ( del orden de 24pF), así como una gran resistencia entre los mismos, a las corrientes de fuga ( mayor a 5 M $\Omega$ ).



Además de esto, los ensambles de suspensión están provistos de un cuerno de arqueo, el cual protegerá a los espaciadores aislantes en caso de que ocurra un corto circuito.

En la figura 3.8 se muestran dos diferentes tipos de ensambles utilizados en líneas de alta tensión para dos subconductores por fase. La figura 3.8 muestra ensambles de suspensión utilizados en líneas con configuración horizontal.

El ensamble de suspensión de la figura 3.8(a), a pesar de tener la ventaja de ser fácilmente construido, presenta la desventaja que el diámetro del disco (un aislador de campana), imposibilita su utilización para líneas de 4 subconductores por fase, en las cuales es necesario emplear una unión central para soportar el par inferior de subconductores.<sup>(1)</sup>



a)

Figura 3.8

b)

En la figura 3.9, se muestra el ensamble propuesto por Hasler<sup>(1)</sup> y el cual se encuentra constituido por un aislamiento de resina protegido por una coraza de metal, la cual sirve como cuerno de arqueado.

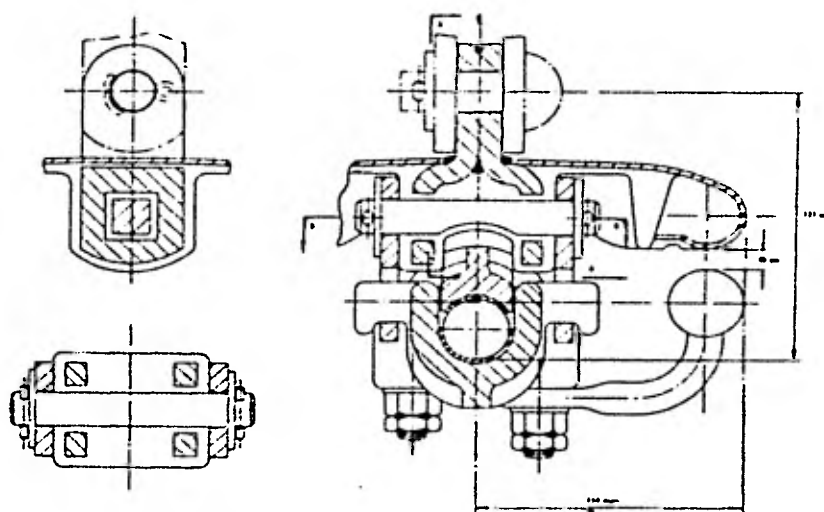


Figura 3.9

Como se puede observar, este tipo de ensambles resultan ser más complicados en su construcción que los de tipo metálico; ésto obviamente encarecerá el costo de los mismos. Sin embargo, la sustitución de los espaciadores y ensambles de suspensión metálicos por los de tipo aislante, así como la utilización de las trampas de onda descritas en la sección 3.3.2, hacen factible el empleo del sistema OPSA como medio de comunicación.

### 3.4 CAMPOS DE INDUCCION Y DE RADIACION<sup>(7)</sup>

La evaluación de los campos electromagnéticos producidos por señales de comunicación en las líneas de transmisión, es de vital importancia debido a la influencia que éstos pueden ejercer sobre otros sistemas de comunicación.

Dependiendo de la distancia\* tomada desde la línea hasta el punto en el cual se manifiestan, estos campos son clasificados en campos de inducción, el cual se manifiesta a distancias cercanas a la línea; y campo de radiación, el cual se produce a mayores distancias. A continuación se explicará la formación de ambos campos en los sistemas OPLAT y OPSA, y se formularán relaciones que permitirán conocer las ventajas de la utilización del sistema OPSA.

#### 3.4.1 Campo de Inducción

Considerando una línea sin pérdidas y gran longitud, como muestra la figura 3.10, la corriente que fluye en cualquier punto sobre la línea está dada por :

---

\* Una ecuación que permite tener una aproximación de la distancia a partir de la cual el campo de inducción empieza a manifestarse como campo de radiación es :  $D = \frac{C}{2f}$  donde : D es la distancia,  $C = 3 \times 10^8$  m/s, f= Frecuencia de la señal. ( Guide to Electric Measurement and Lab. Practice - Wolf).

$$I = I_0 e^{-j\beta Z} \quad [A] \quad \text{---} \quad (3.4)$$

donde :  $I$  es la corriente en el punto sobre la línea  
 $I_0$  es la corriente original  
 $\beta$  es la constante de fase

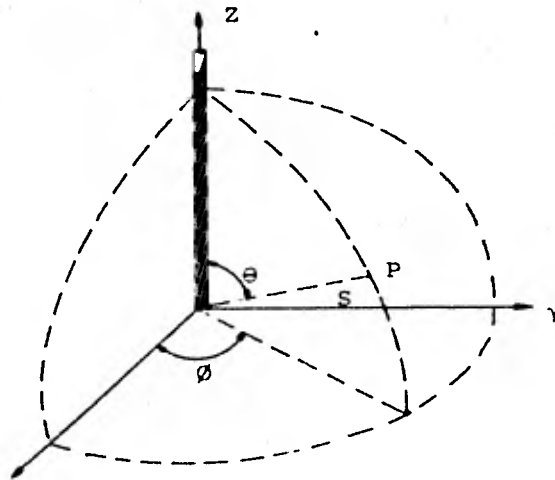


Figura 3.10

Asimismo, el campo magnético estará dado por :

$$H_\phi = \frac{I_0 e^{-j\beta Z} (1 + \cos\theta)}{4\pi S \text{ Sen}\theta} \quad [A/m] \quad \text{---} \quad (3.5)$$

Para la evaluación del campo eléctrico, de las ecuaciones de Maxwell se obtiene :

$$E_0 = n H_\phi \quad [V/m]$$

en donde  $\eta$  es la impedancia característica del medio ( $\approx 120 \pi$  para el espacio libre).

En esta sección, solo son presentadas las ecuaciones relacionadas al campo magnético, dado los fenómenos de inducción y radiación que la presencia de este ocasiona, pudiendo ser evaluado el campo eléctrico mediante la utilización de la ecuación anterior.

Al considerar al punto P lejos del origen y próximo a la línea, entonces 3.5 se convierte en :

$$H_{\theta} = \frac{I_0 e^{-j\beta z}}{2 \pi r} \quad [A/m] \quad \text{---} \quad (3.6)$$

y su magnitud será :

$$|H_{\theta}| = \frac{I_0}{2 \pi r} \quad [A/m] \quad \text{---} \quad (3.7)$$

A continuación se verán las ecuaciones para ambos sistemas :

a) Sistema Oplat

Considerando una línea como lo muestra la figura 3.11, los modos de propagación están dados en la siguiente tabla :

NUMERO DE MODO	CORRIENTE RELATIVA EN LOS CONDUCTORES		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	0	-1
3	1	-(2+\delta)	1

Tabla 3.1

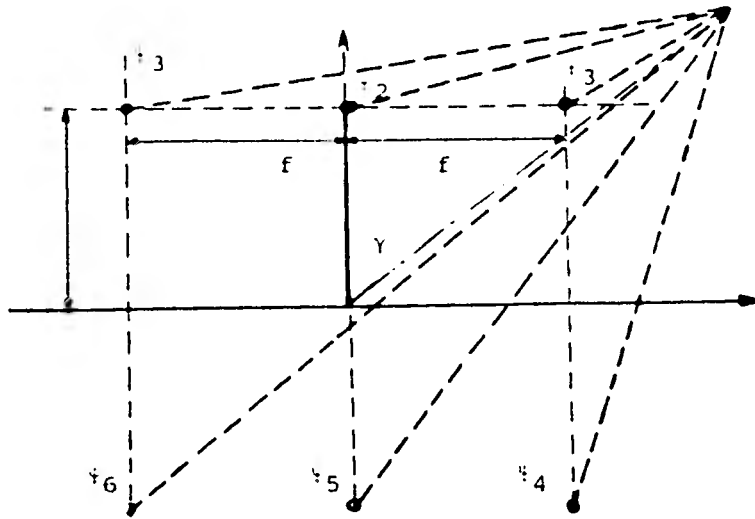


Figura 3.11

Para el modo 1 se tiene que la magnitud del campo magnético en las direcciones X e Y es :

$$|H_x| = \frac{I_0}{2\pi} \left[ \frac{\text{Sen } \psi_1}{\gamma_1} + \frac{\text{Sen } \psi_2}{\gamma_2} + \frac{\text{Sen } \psi_3}{\gamma_3} + \frac{\text{Sen } \psi_4}{\gamma_4} + \frac{\text{Sen } \psi_5}{\gamma_5} + \frac{\text{Sen } \psi_6}{\gamma_6} \right] \text{---3.8.a}$$

$$|H_y| = \frac{I_0}{2\pi} \left[ -\left( \frac{\text{Cos } \psi_1}{\gamma_1} + \frac{\text{Cos } \psi_2}{\gamma_2} + \frac{\text{Cos } \psi_3}{\gamma_3} \right) + \frac{\text{Cos } \psi_4}{\gamma_4} + \frac{\text{Cos } \psi_5}{\gamma_5} + \frac{\text{Cos } \psi_6}{\gamma_6} \right] \text{---3.8.b}$$

Si  $\gamma > h$  y  $\gamma \ll f$ , la magnitud total del campo magnético se reduce a (7):

$$|H|_1 = \frac{3I_0 h}{\pi \gamma^2} \text{--- (3.9) (Modo 1)}$$

Análogamente se obtiene:

$$|H|_2 = \frac{4I_0 f}{\pi \gamma^3} \text{--- (3.10) (Modo 2)}$$

$$|H|_3 = \frac{I_0 h \epsilon}{\pi \gamma^3} \quad (3.11) \quad (\text{Modo 3})$$

Como se observó en la Sección 2.5, al transmitir en modo 3 se tiene la menor atenuación de la señal. Asimismo aunque el modo 2 presenta una variación en magnitud del campo magnético a una razón de  $1/\gamma^3$ , tiene la desventaja de poseer una mayor atenuación que el modo 3. Finalmente, el modo 1 presenta una ley de variación de intensidad igual a la del modo 3; sin embargo, este modo, debido a que presenta la atenuación más alta, es el menos favorable.

b) Sistema OPSA.

Para un sistema OPSA con dos conductores por fase, tal como lo muestra la Fig. 3.12, debido a la atenuación que existe entre las fases (ver Sección 3.5), no es necesario considerar las 3 fases para la evaluación de la línea, sino solamente una de ellas.

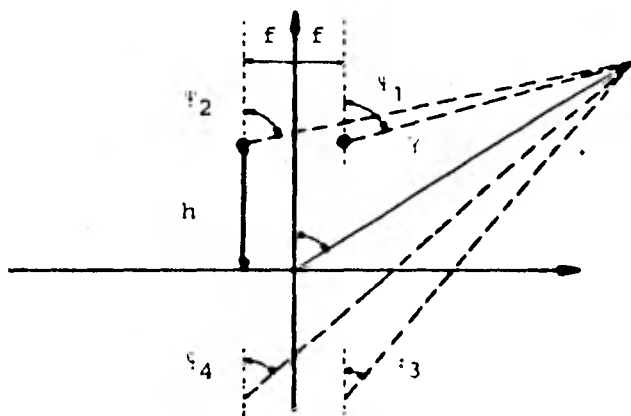


Figura 3.12

Refiriéndose a la figura 3.12, la magnitud de las componentes en la dirección X e Y están dadas por :

$$|H_x| = \frac{I_0}{2\pi} \left[ \frac{\text{Sen} \psi_1}{r_1} - \frac{\text{Sen} \psi_2}{r_2} - \frac{\text{Sen} \psi_3}{r_3} + \frac{\text{Sen} \psi_4}{r_4} \right] \text{--- (3.12.a)}$$

$$|H_y| = \frac{I_0}{2\pi} \left[ \frac{\text{Cos} \psi_1}{r_2} - \frac{\text{Cos} \psi_1}{r_1} - \frac{\text{Cos} \psi_4}{r_4} + \frac{\text{Cos} \psi_3}{r_3} \right] \text{--- (3.12.b)}$$

Si  $r \gg h$  y  $r \ll f$ , entonces la magnitud total del campo magnético se reduce a (7)

$$|H| = \frac{4I_0 h f}{\pi r^3} \text{--- (3.13)}$$

Este resultado indica que el campo decrece a una razón  $1/r^3$ , lo cual significa que está "fuertemente ligado" a los subconductores.

Los campos de inducción para ambos sistemas han sido calculados presentándose los resultados obtenidos en la figura 3.13.

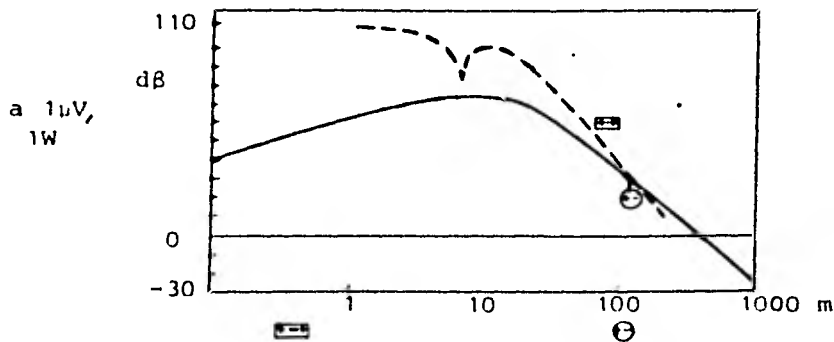


Figura 3.13



Para comparar los sistemas OPISA y OPLAT se ha relacionado la magnitud del campo magnético presente en el primero con la presentada en el modo 3 del sistema OPLAT, resultando :

$$M = \frac{|H_{1c}|}{|H_3|} = \frac{4f}{\delta\gamma} \text{ - - - - - ( 3.14)}$$

Por ejemplo, para una línea con una altura  $h = 15m$ ,  $f = .15m$ ,  $\gamma = 1Km$ , se tiene que  $m$  equivale a  $-42dB$ , lo cual indica que existe una gran ventaja en la utilización del sistema OPISA debido a que la intensidad en el campo de inducción se reduce.

3.4.2 Campo de Radiación.

El cálculo del campo de radiación producido por los sistemas de comunicación en líneas de transmisión, es de particular importancia debido a los efectos de interferencia que éste pueda tener sobre sistemas de comunicación distantes de las líneas, pudiendo ser un ejemplo de éstos, el sistema de navegación aérea.

Para realizar ésto, de acuerdo a lo mostrado en la figura 3.14, se supone  $s \gg h$  y  $s \ll f$ .

Utilizando las ecuaciones 3.5 a 3.7, se obtiene (7)

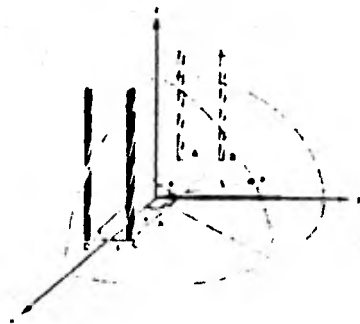


Figura 3.14

a) Para el sistema OPLAT descrito en la sección anterior.

$$|Hr|_1 = \frac{3I_0 h (1 + \cos \theta) \cos \phi}{s \lambda} [A/M] \quad (\text{Modo 1}) - - - - - (3.15)$$

$$|Hr|_2 = \frac{4\pi I_0 f h (1 + \cos \theta) \text{Sen } \theta \text{ Sen } 2\phi}{s \lambda^2} [A/H] \quad (\text{Modo 2}) - - - (3.16)$$

$$|Hr|_3 = \frac{I_0 \delta n (1 + \cos \theta) \cos \phi}{s \lambda} [A/M] \quad (\text{Modo 3}) - - - (3.17)$$

y para el sistema OPSA :

$$|Hr|_{lc} = \frac{2 \pi I_0 f h (1 + \cos \theta) \text{Sen } \theta \text{ Sen } 2\phi}{2 \lambda^2} [A/M] - - - (3.18)$$

donde  $\gamma$  es la longitud de onda de la onda portadora.

Relacionando las magnitudes de los campos de radiación del sistema OPSA y del modo 3 del sistema OPLAT se obtiene :

$$J = \frac{|Hr|_{lc}}{|Hr|_3} = \frac{4\pi f (\text{Sen } \theta \text{ Sen } \phi)}{\delta \lambda} - - - - - (3.19)$$

$$J \text{ máx} \leq \frac{4\pi f}{\delta \lambda} - - - - - (3.20)$$

El valor de esta relación para la línea descrita en el ejemplo de la sección 3.41, operando a una frecuencia de 1MHz, con una  $\lambda = 300\text{m}$  y  $\delta = .8$  es equivalente a  $-22\text{dB}$ , lo que confirma la ventaja de utilizar el sistema OPSA, como medio de comunicación en líneas de alta tensión.

En la siguiente tabla se muestran los valores de  $J_{\text{máx}}$  para diferentes frecuencias de portadora:

f (KHz)	$\lambda$ (m)	Jmáx (db)
100	3000	- 42
300	1000	- 32
500	600	- 28
700	429	- 25
1000	300	- 22
1300	231	- 20
1500	200	- 18

Tabla 3.2

## 3.5 ATENUACION E IMPEDANCIA CARACTERISTICA (5)

La atenuación total que presenta una señal de comunicación en una línea de transmisión depende de diversos factores, siendo los principales la resistencia del conductor, el modo de transmisión, frecuencia específica de trabajo y el efecto causado por el aislamiento de las partes mecánicas ( espaciadores, ensambles, etc.).

En los sistemas OPSA compuestos por 2 subconductores cuando es aplicada una señal de portadora a una de las fases de la línea, la distribución de modos se lleva a cabo en forma tal que las corrientes y los voltajes en los subconductores de la fase acoplada se encuentran dirigidas opuestamente ( ver figura 3.15), mientras que en las demás fases del sistemas, son prácticamente igual a cero ( ver Sección 3.7), por lo que las pérdidas que éstas ocasionan son despreciables.

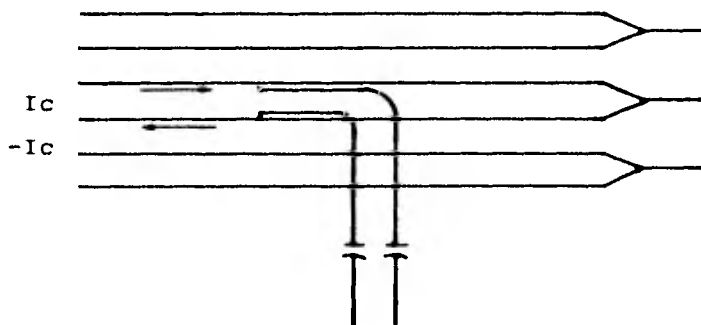


Figura 3.15

Como consecuencia de lo anterior, la utilización de una fase en el sistema OPSA compuesto por 2 subconductores por fase, puede ser considerada como una simple línea de dos conductores e independiente de las otras fases y de tierra.

En tal caso, el factor de atenuación para una línea de tales características se obtiene del estudio clásico de las líneas de transmisión y es igual a :

$$\alpha = \frac{R_c}{2Z_0} \text{ - - - - - ( 3.21 )}$$

donde :

$$R_c = \frac{1.43}{r(n+2)} \sqrt{\frac{\mu w}{2\sigma}} \text{ - - - - - ( 3.22 )}$$

- Siendo :
- n = Número de hilos externos del trenzado de cada subconductor.
  - r = Radio
  - σ = Conductividad (Ω/m )
  - μ = Permeabilidad (H/m)
  - w = Velocidad angular de la señal.

Asímismo Z<sub>0</sub> representa la impedancia característica de la línea, la cual para un sistema OPSA se encuentra dada por :

$$Z_0 = 120 \ln \frac{s}{r} \text{ - - - - - ( 3.23 )}$$

- donde :
- s = Espaciamiento entre las fases
  - r = Radio del conductor.

Esta impedancia presenta valores menores a los característicos de los sistemas OPLAT, dependiendo únicamente de las características geométricas de la línea ( los valores encontrados fueron del orden de 430  $\Omega$ ).

Por otro lado, la atenuación debida a las pérdidas ocasionadas por los aislamientos del sistema OPSA, pueden ser calculados utilizando la ecuación (3.24), considerando que la resistencia a las corrientes de fuga y la capacitancia propia de los espaciadores y ensambles, se encuentran uniformemente distribuidos a lo largo de la línea.

$$\Delta\alpha = \left[ \frac{R_c}{2Z_0} \left( \frac{C_s}{2L_s C} + \frac{C_{ins}}{2L_{ins} C} \right) + \frac{Z_0}{2} \left( \frac{1}{R_c L_s} + \frac{1}{R_{ins} C_{ins}} \right) \right] - - - (3.24)$$

Donde :

- $Z_0$  = Impedancia característica
- $R_s, C_s$  = Resistencia y capacitancia a las corrientes de fuga de un espaciador.
- $L_s$  = Distancia entre espaciadores
- $R_{ins}, C_{ins}$  = Resistencia y capacitancia a las corrientes de fuga de los ensambles de suspensión.
- $L_{ins}$  = Capacitancia por metro de los subconductores.

Por lo tanto, la atenuación total del sistema estará dada por:

$$\alpha = \frac{R_c}{2Z_0} + \Delta\alpha - - - - - (3.25)$$

Mediciones efectuadas<sup>(5)</sup>, comprobaron los resultados obtenidos por medio de las anteriores expresiones, habiéndose medido los siguientes valores de atenuación para una línea con 100 Km de longitud.

5.5 dB a 6.5 dB para una frecuencia de 100 KHz  
 10 dB a 12 dB para una frecuencia de 300 KHz  
 13 dB a 15 dB para una frecuencia de 400 KHz

La figura 3.16 muestra el factor de atenuación calculado y medido en un sistema OPSA comparando la atenuación existente al utilizar la fase central y la fase externa para la línea descrita en la sección (3.8).

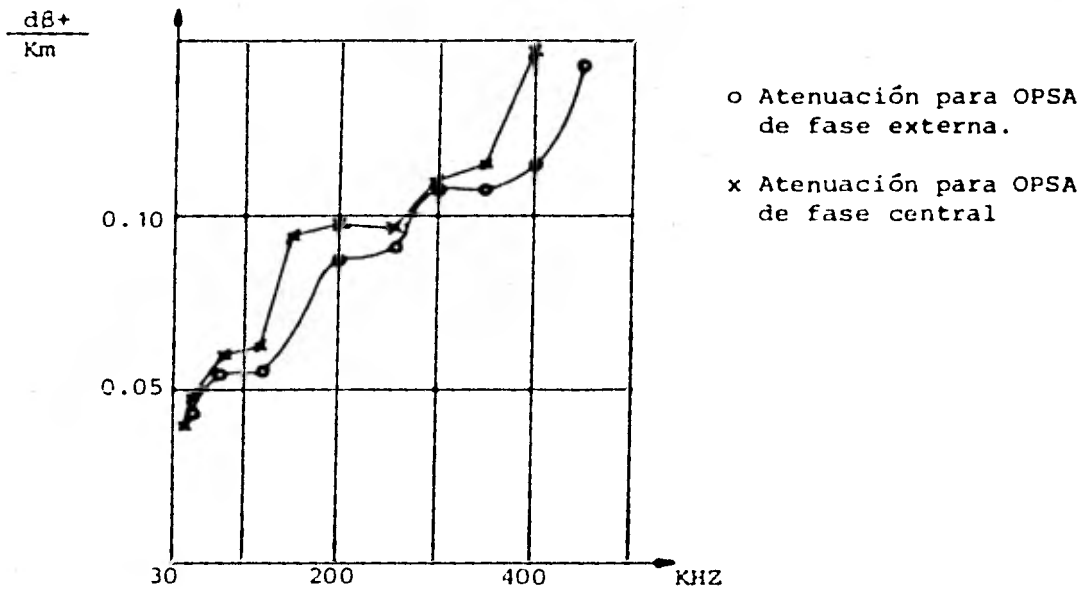


Figura 3.16

3.6 ANCHO DE BANDA<sup>(4,6)</sup>

El rango de frecuencias usado en el sistema OPLAT varía de 30 a 500 KHz, encontrándose determinada la frecuencia superior, entre otros factores por el espaciamiento existente entre fases.

Por otra parte, en los sistemas OPSA, debido al pequeño espaciamiento que existe entre los subconductores de una misma fase (0.25 a 0.4m), es posible utilizar un rango mayor de frecuencias que el utilizado en los sistemas OPLAT. El análisis para la evaluación del ancho de banda de un sistema OPSA de 2 subconductores por fase, es mostrado a continuación.

La atenuación que existe en los sistemas OPSA es debida principalmente a las pérdidas producidas por el efecto Skin y la resistencia que presentan los espaciadores y los ensambles de suspensión.

De la constante de propagación se puede ver que el coeficiente de atenuación debido al efecto Skin está dado por la ecuación (2.21). Por otra parte, las pérdidas debidas a los espaciadores no solo son causadas por la resistencia de éstos, si no también por el efecto de resonancia que se presenta a ciertas frecuencias, debido al distanciamiento regular entre los espaciadores.

Para analizar el comportamiento de la línea, se supondrá que ésta se encuentra formada por secciones idénticas tal como lo muestra la figura 3.17.



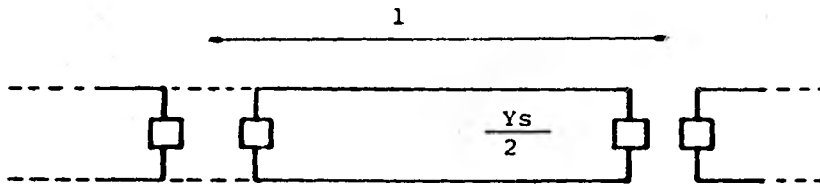


Figura 3.17

La admitancia característica de la línea formada por los subconductores será llamada  $Y_0$ .

La matriz de transferencia  $[A]$  de una de las secciones es :

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_s/2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Cosh}(\gamma s) & Z_0 \text{Senh}(\gamma s) \\ Y_0 \text{Senh}(\gamma s) & \text{Cosh}(\gamma s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_s/2 & 1 \end{bmatrix} \text{ --- ( 3.26 )}$$

- donde :
- $Y_0$  = Es la admitancia característica de la línea formada por los subconductores.
  - $Y_s$  = Es la admitancia de los estaciadores.
  - $Z_0$  = Es la impedancia característica de la línea.
  - $\gamma$  = Es el coeficiente de propagación
  - $s$  = Es la distancia entre espaciadores.

Tomando la matriz  $[A]$  como una matriz cuadrada de  $2 \times 2$ , se obtiene :

$$[A] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \text{ --- (3.27)}$$

Donde :

$$a_{11} = a_{22} = \text{Cosh}(\gamma_s) + \frac{\gamma_s}{2\gamma_0} [\text{Senh}(\gamma_s)] \text{ --- (3.28)}$$

$$a_{12} = Z_0 \text{ senh}(\gamma_s) \text{ --- (3.29)}$$

$$a_{21} = \gamma_s \text{ Cosh}(\gamma_s) + \gamma_0 \left[ 1 + \left( \frac{\gamma_s}{2\gamma_0} \right)^2 \right] \text{ Senh}(\gamma_s) \text{ --- (3.30)}$$

Los eigenvalores ( $n$ ) de  $[A]$  determinarán los coeficientes de propagación de la red, estando dadas por :

$$n = a_{11} \pm \sqrt{a_{12} a_{21}} \text{ --- (3.31)}$$

De las ecuaciones 3.28 a 3.30 se obtiene :

$$a_{11}^2 - a_{12} a_{21} = 1 \text{ --- (3.32)}$$

Por lo que :

$$n = a_{11} \pm \sqrt{a_{11}^2 - 1} \text{ --- (3.33)}$$

Transformando la ecuación (3.28) :

$$a_{11} = \text{Cosh}(\gamma_s) + \frac{\gamma_s}{2\gamma_0} \text{ Senh}(\gamma_s) \text{ --- (3.23)}$$

$$\cong R \cosh (\gamma s + \phi) \text{ - - - - - (3.34)}$$

$$R = \frac{1}{1 - \left(\frac{Y_s}{2Y_0}\right)^2} \quad \text{Tan } h\phi = \frac{Y_s}{2Y_0}$$

Suponiendo  $Y_s \ll Y_0 \implies R \cong 1 \quad \frac{Y_s}{Y_0} = \phi$

permitiendo ésto expresar :

$$n = e^{[\gamma x + \phi]} \text{ - - - - - (3.35)}$$

Finalmente :

$$[A] = \begin{bmatrix} \cosh (\gamma s + \phi) & Z_0 \sinh (\gamma s) \\ Y_0 \sinh (\gamma s + Z\phi) & \cosh (\gamma s + \phi) \end{bmatrix} \text{ - - - (3.36)}$$

donde :  $\phi = \frac{Z_0}{2R_s} + \frac{j\omega C_s Z_0}{2}$

Siendo :

- $R_s$  = resistencia en paralelo de los espaciadores
- $C_s$  = capacitancia en paralelo de los espaciadores

El coeficiente de atenuación debido a todos los espaciadores es:

$$\alpha_s = \frac{MZ_0}{2R_s} [N_p/m] \text{ - - - - - (3.37)}$$

donde M es el número de espaciadores por metro.

Para obtener la impedancia total característica de la línea ( $Z_c$ ), se parte de las ecuaciones básicas :

$$V_1 = a_{11} V_2 + a_{12} I_2 \text{ - - - - - ( 3.38 )}$$

$$V_2 = a_{21} V_2 + a_{22} I_2 \text{ - - - - - ( 3.39 )}$$

Haciendo  $V_2 = Z_c I_2$  se obtiene :

$$Z_c = \frac{\sqrt{a_{12}}}{a_{21}} \text{ - - - - - ( 3.40 )}$$

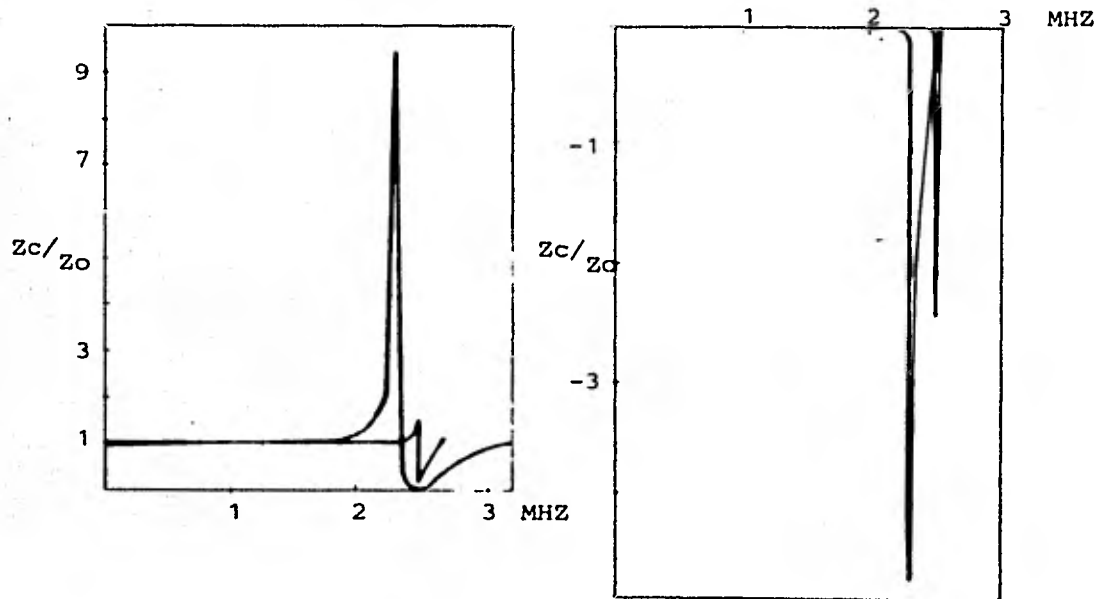
Sustituyendo (3.32) en (3.40) :

$$Z_c = \frac{a_{12}}{\sqrt{a_{11}^2 - 1}} \text{ - - - - - ( 3.41 )}$$

Ahora, al sustituir los elementos de (3.36) en (3.41), se tiene :

$$Z_c = \frac{Z_0 \operatorname{senh}(\gamma s)}{\operatorname{Sen} h(\gamma s - \phi)} \text{ - - - - - ( 3.42 )}$$

Las figuras 3.18.1 y 3.18.b, muestran las gráficas de la parte real y de la parte imaginaria para la relación  $Z_c/Z_0$ , habiendo sido obtenidas por medio de la ecuación para dos diferentes valores de la capacitancia de los espaciadores. Los valores de la resistencia de los espaciadores fueron tomados de  $1M\Omega$ , y los de la capacitancia de  $5pF$  y  $50 pF$ , con espaciamiento entre los espaciadores de  $60m$ .



a

FIGURA 3.18

b

Para este intervalo se mostró que efectos de resonancia ocurren a los 2.5MHz, observándose que solo a frecuencias cercanas a ésta,  $Z_c$  es muy diferente de  $Z_o$ , existiendo por lo tanto un desacoplamiento de impedancias.

Las pérdidas para 2 tipos de subconductores, fueron calculadas asumiendo una resistencia de  $1\text{ M}\Omega$  y espaciamiento entre estos de 60m, pudiendo observarse sus valores en la tabla 3.3.

Tipo de conductor en Haz	Pérdida Skin $d\beta/Km$	Pérdida de espacia- dores $d\beta/Km$	Pérdida to- tal $d\beta/Km$	Zo $\Omega$
Lynx *	0.181	0.03	0.211	413
Zebra **	0.138	0.027	0.165	367

Tabla 3.3 ( Ref. 6)

Por lo anterior, puede concluirse que el ancho de banda del sistema OPSA es aproximadamente 5 veces mayor que el proporcionado por los sistemas OPLAT, teniendo ésto grandes atractivos para la utilización de un mayor número de canales de comunicación.

\* El conductor Lynx tiene un diámetro de 1.96cm, con 7 hilos de acero y 30 de aluminio.

\*\* Conductor Zebra: 2.80cm de diámetro, 7 hilos de acero y 54 de aluminio, en ambos casos los centros están 0.3m distantes.

3.7 DIAFONIA (CROSSTALK )<sup>(III)</sup>

Para poder realizar un enlace de comunicación confiable, en cualquier sistema de comunicación, es necesario que las señales recibidas en un punto sean lo más parecidas posibles a las transmitidas en el otro extremo del enlace.

Para esto, el sistema utilizado debe ser lo más inmune posible a las señales que lo perturban, producidas por otros sistemas cercanos a éste.

La diafonía es considerada como un caso particular de interferencia creada por señales indeseables, y se puede expresar como la razón de potencia  $P_0$  de una señal ( de un circuito perturbador a la potencia  $p_1$  que alcanza el circuito perturbado.

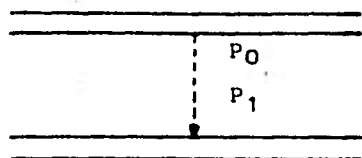


Figura 3.19

La naturaleza de la interferencia causada por la diafonía se describe como ininteligible o ininteligible. Cuando ésta se presenta entre canales de comunicación diferentes es usualmente ininteligible debido a inversión de frecuencia, desplazamiento de frecuencia en sistemas analógicos o codificación digital en sistemas digitales.

También en sistemas que utilizan multiplexaje por división en frecuencia (FDM), se puede presentar debido a productos de intermodulación indeseados.

El uso de la palabra intellegible o inintellegible, no tan solo se aplica a canales que lleven señales de voz, si no también puede ser aplicado a circuitos que conduzcan diferentes tipos de señales. En tales casos, intellegible implica que la interferencia debida a la diafonía es del mismo tipo de señal que la usada en el circuito de comunicación afectado. Similarmente inintellegible resulta de señales de diferentes tipos que las utilizadas por el circuito perturbado.

La diafonía es causada principalmente por acoplamiento electromagnético, y se manifiesta fundamentalmente en tres tipos :

i). Diafonía por terminal cercana (NEAR-END)

Este tipo de diafonía abreviada NEXT es debida a la energía de la señal perturbadora, que viaja en dirección opuesta a aquella de la señal del circuito perturbador ( Fig. 3.20).

ii). Diafonía por terminal lejana (FAR END, FEXT)

Es aquella en que la energía viaja en la misma dirección que la señal del circuito perturbador.

iii). Diafonía por interacción.

Esta es causada por el acoplamiento mediante un tercer conductor ( terciario).



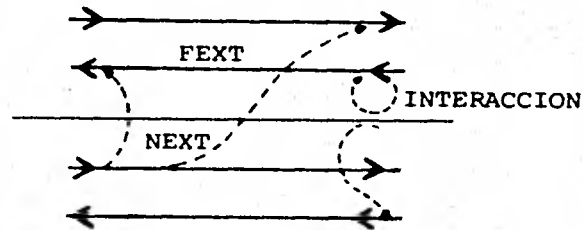


Figura 3.20

Para propósitos de comunicación, en una línea trifásica con subconductores aislados, dada la cercanía de éstos, se puede considerar cada fase como un par balanceado. Por otro lado, dada la distancia existente entre fases ( 9.5m en disposición horizontal), los pares están sujetos a este tipo de interferencia.

Por otro lado, en un sistema OPLAT, este fenómeno no se presenta entre fases, debido al hecho que las tres fases se utilizan como un solo medio de comunicación. Esta ventaja, sin embargo, no se justifica, dado el desaprovechamiento que existe al no utilizar cada fase como un enlace de comunicación individual.

Brestkina et al<sup>(5)</sup>, han reportado las mediciones efectuadas a la línea descrita en la sección 3.8. En esta línea se utilizaron tres acoplamientos, dos de ellos, empleando acoplamiento mediante conductores aislados y un tercero mediante un acoplamiento convencional de fase a tierra, tal como lo muestra la figura 3.21.

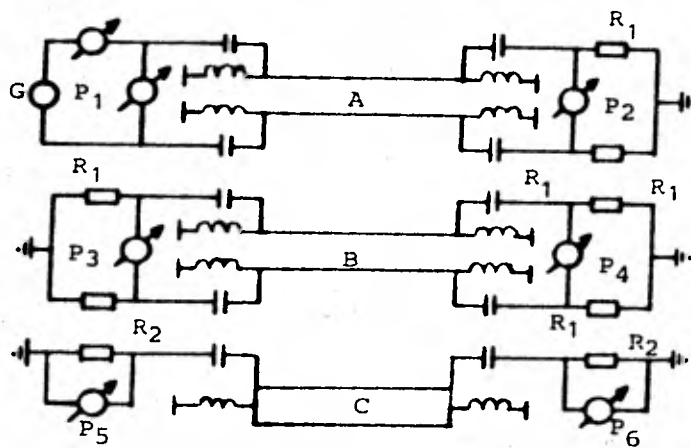


Figura 3.21

Para el cálculo de la atenuación entre fases, debidas a la diafonía se utilizaron las siguientes ecuaciones :

$$A_{n}^{A-B} = P_1 - P_3 + 10 \log \frac{2R_1}{2}$$

$$A_{nc\grave{a}t}^{(A-C)} = P_1 - P_5 + 10 \log \frac{2R_1}{2_1}$$

$$A_{fext}^{(A-B)} = P_2 - P_4$$

$$A_{fext}^{(A-C)} = P_2 - P_6 + 1 - \log \frac{R_2}{2R_1}$$

El valor medio de atenuación medido para NEXT entre las dos fases acopladas por subconductores aislados fué de 60dB y para el caso de una fase con subconductores aislados y otra mediante un acoplamiento de fase a tierra resultó ser de 40 dB.

Para el caso de FEXT, los resultados obtenidos son de 20 a 30dB mayores para las fases aisladas en comparación con los resultados obtenidos cuando se utiliza una fase aislada y un acoplamiento de fase a tierra. Estos están graficados en la figura 3.22 .

Los resultados anteriores confirman que debido a la gran atenuación que existe entre cada fase aislada en un sistema OPSA, es posible utilizar cada fase de la línea como un enlace de comunicación individual. Esto triplica la capacidad de transmisión de información y aunado a un ancho de banda aproximadamente 5 veces mayor ( ver sección 3.4), se puede pensar que, teóricamente, el sistema OPSA proporciona 15 veces más capacidad de comunicación.

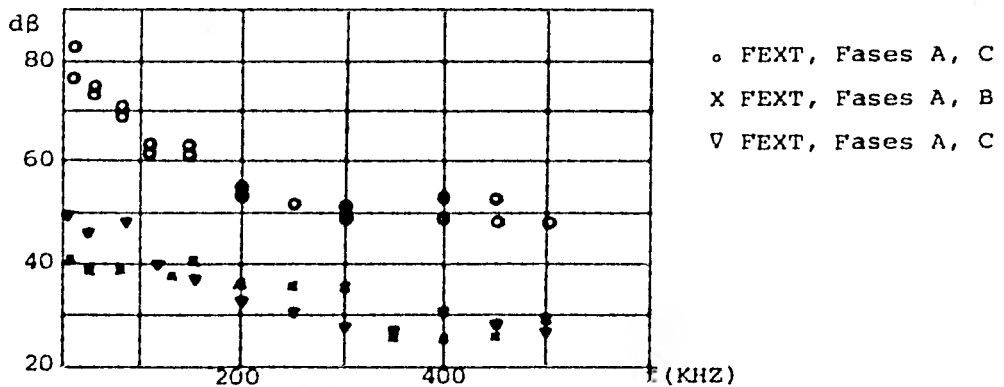


Figura 3.22

### 3.8 FENOMENO CORONA

Las descargas eléctricas corona se originan en la superficie de un conductor cuando la intensidad de campo eléctrico sobre la superficie del mismo, excede el esfuerzo de ruptura de aire, llamándosele corona por el efecto que presentan los cables al tener una aureola luminosa alrededor de ellos, influyendo en su formación diversos factores, siendo éstos : la presencia de gotas de agua en la superficie del conductor y discontinuidades que éste presenta, densidad y humedad del aire, y condiciones superficiales en cuanto al tiempo que ha tenido en servicio al conductor.

Existen dos tipos de descargas corona en los conductores de las líneas de alto voltaje, siendo éstos :

a) Procesos de corona negativos.

El fenómeno consiste en una serie de pulsos de corriente de baja amplitud cuya velocidad de repetición dependerá de lo puntiagudo del punto de discontinuidad. Este fenómeno principalmente aparece durante condiciones de conmutación y propagación de sobrevoltajes, o momentáneamente cuando el voltaje cambia de polaridad positiva o negativa.

b) Procesos de corona positivos.

Las descargas de este tipo se presentan en dos diferentes formas, la primera se manifiesta en forma de resplandor fijo, mientras que la segunda es una sucesión de pequeños y repentinos flamazos.

Esta forma de proceso corona crea la mayoría del ruido de radio en líneas de transmisión. La figura 3.23 muestra las diferentes formas de corona que pueden ser encontradas en una línea de transmisión de alto voltaje.

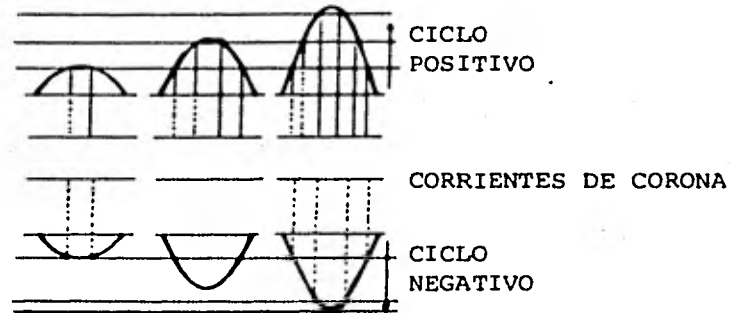


Figura 3.23

### 3.8.2 Corona en Subconductores en Haz Aislados.

El fenómeno corona en sistemas OPSA es cuantitativamente diferente al observado en un sistema que no tiene subconductores aislados.

Ha sido observado que en los sistemas OPLAT, utilizando acoplamiento fase a tierra, se forman tres crestas de corona en un ciclo de la frecuencia de potencia, uno de ellos formado en la fase acoplada, y los otros dos en las otras fases; mientras que en un sistema OPSA solo se forma una, ocurriendo su formación cerca del valor máximo del ciclo positivo del voltaje de la frecuencia de la señal de potencia. La formación de estas crestas se muestra en la figura 3.24



No. a Escala

Figura 3.24

El nivel de ruido medido en la línea en estudio, mostró que la magnitud de los pulsos de ruido corona en la fase del sistema OPSA utilizada, es aproximadamente dos veces mayor que la magnitud de ruido obtenida en una fase del sistema OPLAT con acoplamiento fase a tierra. Sin embargo, a pesar de lo anterior, el ruido promedio debido a corona, resulta ser igual en el sistema OPSA, debido a que en los sistemas OPLAT se forman tres crestas.

Las características de la línea medida fueron las siguientes :

Distancia entre espaciadores	=	35m
Longitud	=	61.4 Km
Fases	=	Trifásica con dos hilos de guarda.
Configuración	=	Dos subconductores por fase en disposición horizontal.
Distancia entre fases	=	9.5m.
Distancia entre subconductores	=	21.8m.

Altura de las fases	=	21.8m.
Catenaria	=	14m
Tipos de conductor	=	2xASO-300ACSR $\varnothing=2.35\text{cm}$
Espaciadores aislantes	=	C= 5pF R= 10m $\Omega$

El nivel de ruido para una frecuencia de 200KHz y un ancho de banda de 100Hz, fué de aproximadamente -25dB (RMS) para ambos acoplamientos. A otras frecuencias, en el rango de 50 a 300KHz, los niveles medidos fueron mayores para el sistema OPSA de 3dB a lo mucho, teniendo un valor de 330mV para el sistema OPSA y de 160mV para la fase acoplada del sistema OPLAT.

Por lo tanto, si se conoce el momento en el que se forma la cresta de ruido dentro del ciclo de la frecuencia de la señal de potencia, es posible incrementar la relación señal-ruido de los canales de comunicación en el sistema OPSA, por medio de la transmisión de información discreta en una fase o por medio de información continua utilizando dos canales en diferentes fases (ver Fig. 3.25).

En sistemas OPSA debe hacerse notar que para ruido de tipo impulsivo, aún no han sido realizadas pruebas que determinen su magnitud y efectos.

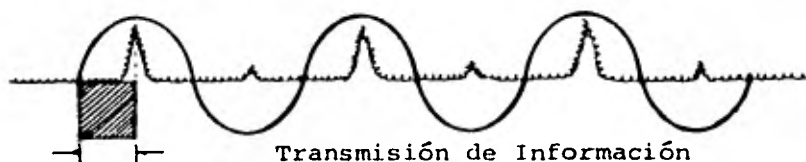


Figura 3.25

## 3.9 CONDICIONES DE FALLA (1,2,3,6,10,12,14)

Se ha visto que bajo condiciones normales de operación de la línea de alto voltaje, el sistema OPSA, presenta grandes ventajas sobre el sistema OPLAT, sin embargo, en condiciones normales de operación, tales como fallas de corto circuito o sobrevoltajes, la línea se comporta de diferentes manera.

A continuación se describe el comportamiento de la línea con conductores en haz, haciendo notar que las pruebas realizadas en sistemas OPLAT y OPSA, han contemplado únicamente el comportamiento en corto circuito de la línea y los efectos que se producen principalmente en los espaciadores. Por lo que, cabe indicar que existen pocos datos al respecto.

En la línea de transmisión los espaciadores metálicos o aislados normalmente se encuentran sometidos a dos fuerzas debidas a fenómenos eléctricos, siendo éstas :

- a) Una fuerza electrostática de repulsión que es proporcional al cuadrado del voltaje de línea e inversamente proporcional al espaciamiento entre subconductores.
- b) Una fuerza electromagnética de atracción, proporcional al cuadrado de la corriente de línea e inversamente proporcional al espaciamiento entre subconductores.

En condiciones normales de operación, estas fuerzas tienden a cancelarse entre sí. Sin embargo, al ocurrir una falla de cortocircuito el voltaje en la línea tiende a cero, aumentando considerablemente la corriente en la línea. Este efecto produce



una gran fuerza electromagnética de atracción, la cual ocasiona que los subconductores tengan contacto entre sí. Esto a su vez repercute en los sistemas de comunicación descritos.

i) Sistema OPLAT.

En el caso de este sistema, en donde los subconductores de la fase se encuentran unidos metálicamente, se han realizado diversas pruebas para estudiar el comportamiento de la línea. Entre los más significativos se encuentran los proporcionados por Rettallack et al<sup>(14)</sup>. En estos se puede ver el comportamiento de los espaciadores bajo condiciones de corto circuito y sobrecarga.

Para esta prueba se utilizaron dos subconductores de 795,000 CMACSR en un arreglo horizontal, presentando un espaciamiento entre ellos de .4m, habiendo aplicado corrientes asimétricas hasta de 36.4 KA, con duraciones hasta de 6.5 ciclos. Asimismo, para condiciones de sobrecarga se aplicaron corrientes de 3.8KA.

Para una falla de corto circuito se observó el comportamiento mostrado en la siguiente figura. Encontrándose mostrada en la figura 3.27, la distancia a la cual ocurre el contacto entre los cables para diversos valores de corriente.

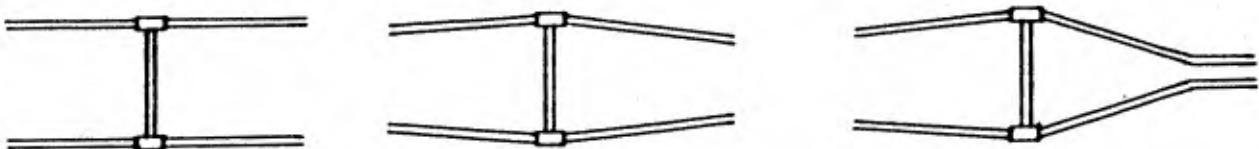


Figura 3.26

Debe hacerse notar que, para espaciadores rígidos, se presentan agudas flexiones en los puntos de unión del espaciador y el cable, pudiendo provocar este hecho severos daños al subconductor, constituyendo este efecto, la principal desventaja al utilizar este tipo de espaciador.

La fuerza de atracción medida entre los subconductores fué de aproximadamente 540Kg para una corriente de 36.4KA, encontrándose se que dicha fuerza varía con el cuadrado de la corriente. Asimismo, se determinaron las corrientes a las cuales los subconductores entran en contacto obteniéndose de estos valores la siguiente figura :

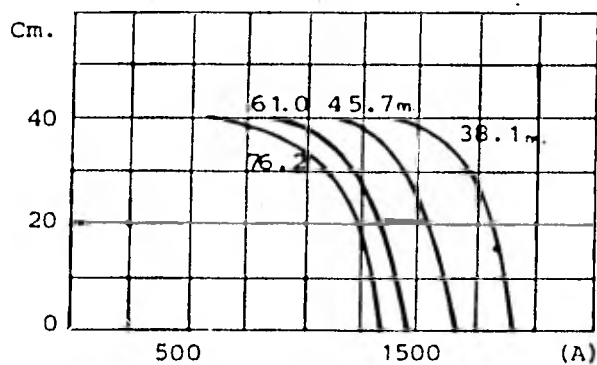


Figura 3.27

ii) Sistema OPSA.

Cuando los subconductores de una fase se encuentran aislados, el comportamiento de la línea bajo condiciones de corto circuito es similar al observado en líneas que utilizan espaciadores metálicos.

Lavtensach, Martin y Schumm<sup>(3)</sup>, realizaron pruebas de corto circuito a líneas con subconductores aislados, obteniendo resultados de las fuerzas generadas en los espaciadores y del tiempo que tardan los subconductores en entrar en contacto entre sí. Los resultados se muestran en la tabla 3.4, habiéndose efectuado este experimento en una línea de tipo horizontal con dos subconductores por fase de 340/30 AL/st, con una distancia entre torres de 150m, encontrándose colocados los espaciadores cada 37m para una corriente de 30KA, y 50m para 53KA.

Corto circuito inicial Corriente KA	Fuerza de compresión kp	Fuerza de tensión kp
30	750	220
53	1,300	460

Corriente de Corto Circuito KA	Intervalo de tiempo en que el primer subconductor hace contacto en msec.
10	120
30	30
53	10 (extrapolado)

Tabla 3.4 ( Ref. 3)

En adición a lo mencionado anteriormente, al emplear este tipo de sistemas, se presentarán otros fenómenos indeseables, siendo és-

tos<sup>(2)</sup>:

a) Arqueo a tierra en un aislador afectando a un solo conductor.

En una línea que utilice dos subconductores aislados por fase, al ocurrir el arqueo, el subconductor afectado es temporalmente aterrizado, mientras el otro mantiene el voltaje de operación. Esta condición, conducirá a posibles arqueos en cualquier punto a lo largo de la línea, de ahí que, para prevenir esta condición, se fije el punto de descarga mediante el cuerno de arqueo del ensamble de suspensión.

b) Rotura de un subconductor.

En un sistema de dos subconductores por fase, al ocurrir la rotura de un subconductor, el otro deberá conducir la corriente total por fase. En este caso, el conductor no afectado podrá resultar dañado. Cuando se utilizan conductores no aislados, ésto solamente afectará la sección entre dos espaciadores sucesivos, mientras que al utilizar espaciadores aislantes, la falla afectará la longitud completa de la línea.

De las condiciones anormales anteriormente descritas, la falla de corto circuito puede ser considerada la más importante debido a su mayor ocurrencia. Por lo tanto, se debe poner una especial atención a la operación de la señal de teleprotección para eliminar la falla lo más rápido posible, dado que, al entrar los subconductores en contacto entre sí, ocurre un corto circuito de las corrientes de portadora, lo cual ocasiona la pérdida de las mismas. Por otro lado, dado que el 85%<sup>(3)</sup> de las fallas de corto circuito son de una sola fase a tierra, la transmisión de la señal de teleprotección puede hacerse de una manera confiable utilizando señales redundantes en las otras dos fases<sup>(1)</sup>.

Otra manera de lograr ésto, es la utilización del<sup>(3)</sup> circuito fantasma mostrado en la figura 3.28. Los filtros de acoplamiento I con una terminal central en el enrollamiento primario, son seguidos por otro filtro de acoplamiento 2 para formar el circuito fantasma. Este tipo de acoplamiento proporciona un acoplamiento convencional de fase a tierra, y por tanto, el contacto entre los subconductores no afectará la protección de la línea.

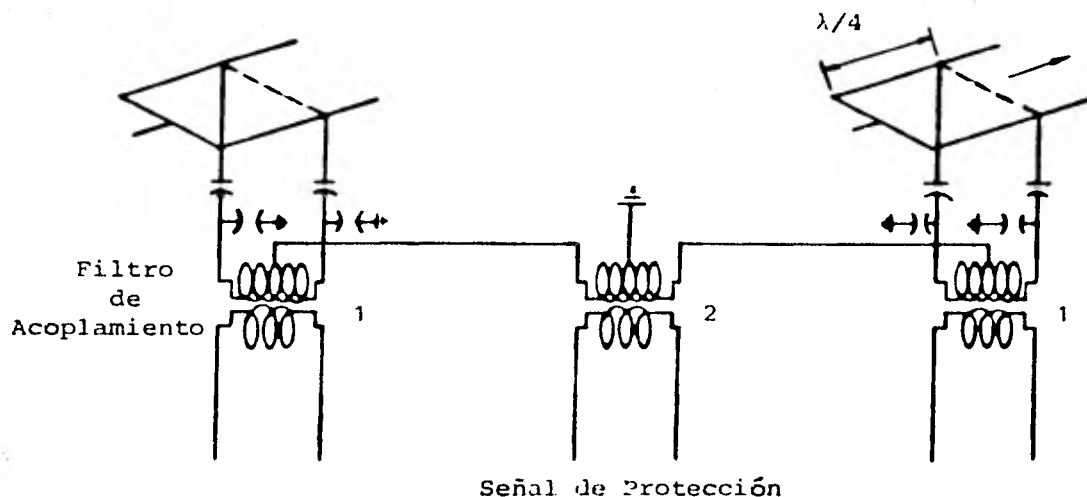


Figura 3.28

### 3.10 APLICACIONES

Debido a las características que presenta el sistema OPSA, es posible utilizarlo para cubrir las siguientes funciones :

#### a) Voz.

Para este tipo de transmisión, las señales pueden ser moduladas en B.L.U. y ser transmitidas con canales con anchos de banda semejantes a los del sistema OPLAT, ésto es 2.5KHz o 4KHz.

#### b) Datos.

La transmisión de datos en el sistema OPSA puede ser llevada a cabo en la misma manera que en el sistema OPLAT, pudiendo por lo tanto, proporcionar los siguientes servicios :

- . Teleimpresión
- . Telemedición
- . Control supervisorio
- . Control automático de generación
- . Alarmas remotas

#### c) Teleprotección.

Para realizar la transmisión de señales de teleprotección en el sistema OPSA se requiere la utilización del arreglo fantasma (ver sección 3.9), o bien el empleo de señales redundantes en 2 fases de la línea con subconductores aislados. Sin embargo, cabe hacer notar que estos arreglos implican un mayor costo del sistema.

De lo expuesto anteriormente, se puede concluir que el sistema OPSA ofrece ventajas sobre el sistema convencional OPLAT, siendo éstas principalmente :

- 1) Un mayor ancho de banda
- 2) Menor radiación y consecuentemente menor interferencia sobre otros sistemas.
- 3) Utilización de fases adyacentes como medio de comunicación individual.

Entre sus desventajas se pueden citar :

- 1) Dispositivos aislantes más complicados que los convencionales en el sistema OPLAT.
- 2) Interrupción del sistema de comunicación al entrar en contacto los subconductores aislados.

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

LIBROS :

- I) EPRI - 300KV and Above Transmission Line Reference Book - 1975 - capítulos 3,4,5,6,7.
- II) Johnson - Transmission Lines and Networks-McGraw Hill - Cap. 1,2,3,4,6,7.
- III) Transmission Systems for Communications, Bell Telephone Laboratories - Capítulo II.
- IV) Podzsek - Carrier Communication Over Power line, Siemens.

ARTICULOS :

- 1) Hasler - The Design and Predicted Performance on Intrabundle Insulation.
- 2) Fleischhaver, Podzsek , Vogl - Multichannel Carrier Transmission over H.T. Bundle Conductors (Siemens, Review XXXI - 1964).
- 3) Lautensach, Martin, Nocker, Schumm - Intrabundle Carrier Communication using the insulated conductors of a power line (CIGRE 1978).
- 4) Pullen - Wide Bandwidth capabilities of intrabundle Communication on High Voltage Lines ( Summer Meeting IEEE - 1974).
- 5) Brestkina et al - Measurement and Calculation of Intrabundle H.F. Communication paths. - (CIGRE 1974)
- 6) Hasler, Martin, Pullen - Communication Systems using



bundle conductor over head power lines (IEEE, Vol. Pas. 94.2, 1975).

- 7) Pullen - The Calculated Electromagnetic Fields Surrounding Carrier - bearing power line conductors (IEEE Vol. Pas. 94, 1975).
- 8) Ishkin et al - Investigation of the noise in power line carrier channels and its effect on speech intelligibility (CIGRE 1978).
- 9) Tovar Martínez - El uso de conductores múltiples de una misma fase.
- 10) Tovar, Caveza, Iaredo - Tendencias actuales en los sistemas de comunicación en las compañías generadoras.
- 11) Ulganovsky, Telephone communication over H.V. Transmission Line Conductor (Gosenergosidat Publishing House, 1953).
- 12) Edwards, Boyd - Conductor spacer design requirements and development of spacer vibration damper. (IEEE Trans. PAS October 1963).
- 13) Pullen - Signal coupling system for intrabundle communication on H.V. lines, Electronic Letter, 1973m Marzo.
- 14) Retallack et al. Bundle conductor spacer on short circuit and overload conditions AIEE, Trans. PAS..

## LISTA DE TABLAS Y FIGURAS DEL CAPITULO III

### I. FIGURAS.

- 3.1 Sistema de transmisión OPSA aplicado a una fase <sup>(3)</sup>
- 3.2 Espaciador aislante <sup>(1)</sup>
- 3.3 Espaciador aislante <sup>(1)</sup>
- 3.4 Arreglo de trampa de onda convencionales
- 3.5 Arreglo de trampa de onda de tap central
- 3.6 Trampas de un cuarto de longitud de onda <sup>(9)</sup>
- 3.7 Acoplamiento mediante una trampa de  $\lambda/4$  <sup>(1)</sup>
- 3.8 Ensamblajes de suspensión aislantes <sup>(1)</sup>
- 3.9 Ensamble de suspensión aislante <sup>(1)</sup>
- 3.10 Línea de transmisión de un solo conductor <sup>(3)</sup>
- 3.11 Línea trifásica horizontal
- 3.12 Línea de dos conductores
- 3.13 Comparación de la intensidad del campo de inducción a nivel de tierra para los sistemas OPSA y OPLAT <sup>(7)</sup>
- 3.14 Campo de radiación para el sistema OPSA <sup>(7)</sup>
- 3.15 Distribución de modos en el sistema OPSA.
- 3.16 Factores de atenuación medidos en el sistema OPSA <sup>(5)</sup>
- 3.17 Distribución de admitancias en líneas con subconductores aislados <sup>(4)</sup>
- 3.18 a) Parte real de la impedancia característica <sup>(4)</sup>  
b) Parte imaginaria de la impedancia característica <sup>(4)</sup>
- 3.19 Diafonía
- 3.20 Tipos de Diafonía
- 3.21 Medición de la atenuación y diafonía entre enlaces OPSA <sup>(5)</sup>
- 3.22 Atenuación de diafonía (FEXT) <sup>(5)</sup>
- 3.23 Modos propios del fenómeno corona en líneas de voltaje alterno <sup>(1)</sup>
- 3.24 Manifestación de ruido corona en los sistemas OPSA y OPLAT <sup>(5)</sup>

- 3.25 Esquema para la transmisión de información en el sistema OPSA
- 3.26 Comportamiento de línea en corto circuito<sup>(14)</sup>
- 3.27 Distancia entre subconductores en función de la corriente<sup>(14)</sup>
- 3.28 Acoplamiento fantasma para la transmisión de señales de comunicación utilizando dos fases de la línea<sup>(9)</sup>

## II. T A B L A S.

- 3.1 Modos de propagación del sistema OPLAT.
- 3.2 Relación de niveles de radiación para los sistemas OPSA y OPLAT ( $\gamma = 1\text{km}$ )
- 3.3 Pérdidas ocasionadas en subconductores aislados por efecto "Skin" y espaciadores aislantes<sup>(6)</sup>
- 3.4 Fuerzas originadas en subconductores en condiciones de corto circuito<sup>(3)</sup>

C A P I T U L O

I V

COMPARACION ECONOMICA ENTRE LOS SISTEMAS OPSA Y OPLAT

I N D I C E

	<u>PAGINA</u>
I N T R O D U C C I O N	3-IV
4.1 CONSIDERACION EN LA EVALUACION	4-IV
4.2 CARACTERISTICA DE LAS LINEAS Y DE LOS SISTEMAS	5-IV
4.3 COSTOS Y EVALUACION DE SISTEMAS	7-IV
4.4 COMPARACION ENTRE SISTEMAS	14-IV

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

Para realizar la selección de un sistema de comunicación entre varias alternativas, es necesario primero, estudiar sus características técnicas, con el objeto de decidir si el sistema resulta apropiado o no para satisfacer los requerimientos de comunicación y, segundo, realizar la evaluación económica de cada alternativa para compararlos entre sí, determinando de esta manera, cual de ellas resulta ser la más económica.

Habiendo sido descritas las características técnicas de los sistemas OPLAT y OPSA, en el presente capítulo se llevará a cabo la evaluación económica de ambos sistemas para poder comparar el costo por canal que presentan.

#### 4.1 CONSIDERACIONES EN LA EVALUACION

Con el objetivo de hacer esta evaluación más significativa, se ha considerado que los sistemas OPLAT y OPSA, serán implementados en una línea aún por construir, con características similares. Consiguientemente, debido a la similitud en cuanto a componentes de los dos sistemas, los costos de mano de obra en la instalación, se han supuesto iguales, y por tanto, para fines de comparación, éstas no son tomadas en consideración.

De igual manera, se ha considerado que los costos de mantenimiento son iguales en ambos sistemas, haciendo notar los posibles efectos de contaminación, así como los daños que los espaciadores pudieran sufrir en condiciones de falla. Esto traería como consecuencia un incremento en los costos de mantenimiento del sistema. Sin embargo, este tipo de efectos no ha sido reportado y su estudio requeriría de extensas pruebas de campo, lo cual está fuera del alcance de este trabajo.



#### 4.2 CARACTERISTICAS DE LAS LINEAS Y DE LOS SISTEMAS.

Una vez asumidas las consideraciones anteriores, a continuación son mencionadas las características de la línea\* en ambos sistemas :

a) Características de la línea:

- . La línea es trifásica operando a 400KV.
- . La corriente nominal es 1 KA.
- . Las fases de la línea presentan 2 subconductores colocados en disposición horizontal (1113 MCM, ACSR).
- . No hay subestaciones intermedias.
- . La distancia entre torres es de 330m. Por lo tanto, el número de ensambles de suspensión es el mismo ( 3/kilómetro).
- . La distancia entre espaciadores es de 40m. Resultando 25 espaciadores/Km en la línea

b) Características en los sistemas OPLAT y OPSA.

Para el sistema OPLAT, se utilizará un acoplamiento de dos fases debido a que, aunque no es el de menores pérdidas\*\*, resulta ser más económico que el acoplamiento modo 3, así como más confiable y eficiente que el acoplamiento de una fase a tierra a pesar de ser éste más barato.

---

\* Los datos expuestos son basados en líneas existentes en operación.

\*\* Ver Sección 2.3

en el caso del sistema OPSA, se llevará a cabo el acoplamiento en una fase externa, analizándose los casos de bloqueo con trampas de derivación central, así como empleando trampas de  $\lambda/4$  operando el sistema a una frecuencia de 250 KHz\*.

Para ambos sistemas se ha considerado una capacidad de 4 canales, debido al hecho de que los equipos transmisores receptores disponibles, son diseñados en la actualidad para el sistema OPLAT.

---

\* Este valor representa la frecuencia media de la banda utilizada en sistemas OPLAT.

## 4.3 COSTOS Y EVALUACION DE SISTEMAS

A continuación son mostrados los costos\* de los componentes de los equipos de acoplamiento y comunicación, así como el de los componentes metálicos y aislantes. Estos costos son en pesos de 1980.

T A B L A 1

E L E M E N T O	PRECIO ( Miles de Pesos )
Capacitor de acoplamiento	700
Trampa de Onda	425
Filtro de Línea	35
Cable de Radio-Frecuencia	0.2/m

\* Los costos de los equipos fueron proporcionados por diversos fabricantes los correspondientes a los componentes metálicos, fueron dados por el Departamento de "Proyectos de Líneas de Transmisión", de la C.F.E. y, finalmente, los de los componentes aislantes por el Central Electricity Research Laboratories (Inglaterra).

T A B L A II

FABRICANTE	PRECIO (Miles de Pesos)
GENERAL ELECTRIC ( 4 Canales )	463
SIEMENS ( 1 canal )	678

T A B L A III

E L E M E N T O	PRECIO (Miles de Pesos)
Espaciador metálico	0.5
Ensamble de suspensión metálico	2.5
Espaciador Aislante	0.6
Ensamble de suspensión Aislante	3.6

El costo del sistema OPLAT se evalúa a continuación, considerando únicamente los costos en los puntos terminales, dado que la línea no requiere acondicionamiento especial. Asimismo, los costos del equipo transmisor-receptor no son incluidos en la evaluación dado que éstos son los mismos en ambos sistemas.

COSTO DE EQUIPOS

ELEMENTO	NO. UNIDADES	COSTO P. V.	IMPORTE
Trampa de onda	4	425	1,700
Capacitor de acoplamiento	4	700	2,800
Filtro de línea	2	35	70
Cable de R.F.	120 Mts.	0.2	24
TOTAL (MILES DE PESOS)			4,594

En el caso del sistema OPSA, además de los costos del equipo terminal, se considera el costo adicional que involucra el uso de espaciadores aislantes, así como los ensambles de suspensión aislantes.

Para el caso de trampa de onda con derivación central\* :

1. COSTO DE EQUIPOS:

ELEMENTO	NO. DE UNIDADES	COSTO P.U.	IMPORTE (Miles de pesos)
Trampa de onda.	2	425	850
Capacitor de acoplamiento	4	700	2,800
Filtro de línea	2	35	70
Cable de R.F.	120m	0.2	24
<b>T O T A L :</b>			<b>3,744</b>

2. COSTOS ADICIONALES

ELEMENTO	COSTO UNITARIO ADICIONAL (Miles de pesos)	NO. UNIDADES por KM.	TOTAL/KM (Miles de pesos)
Espaciadores aislantes.	0.1	25	2.5
Ensamblajes de suspensión	1.1	3	3.3
<b>TOTAL :</b>			<b>5.8/KM</b>

\* Ver Sección 3.2.2

Por tanto, el costo total del sistema por Km será :

$$CT = CF + CV - - - - - 4.1$$

donde :

- CT = Costo total del sistema
- CF = Costo fijo
- CV = Costo variable

entonces :

$$CT = [ 3744 + 5.8/Km ] x 10^3 \text{ Pesos.}$$

En el caso de trampa de un cuarto de longitud de onda, se ha considerado el costo adicional de espaciadores aislantes que se emplean a cada metro, desde el punto de inyección de la señal de comunicación, hasta el remate de la línea en la subestación (ver sección 3.3.2).

1. COSTO DEL EQUIPO:

ELEMENTO	NO. UNIDADES	COSTO P.U.	IMPORTE (Miles de pesos )
Capacitor de acoplamiento.	4	700	2,800
Filtro de línea	2	35	70
Cable de R.F.	120/m	0.2	24
TOTAL			2,894

## 2. COSTOS ADICIONALES :

CONCEPTO	COSTO ADICIONAL UNITARIO (Miles de Pesos )	CANTIDAD	IMPORTE (Miles de Pesos )
Espaciadores aislantes	0.1	25/Km	2.5/Km
Ensamblajes de suspensión aislantes	1.1	3/Km	3.3/Km
Cable de R.F. (2)	0.2	600/m	120
Espaciadores aislantes para tendido de trampa $\lambda/4$	0.6	600	360
		TOTAL	480 + 5.8/Km

\* Nótese que a una frecuencia de portadora de 250 KHz, se tiene una longitud de onda de 1200m, y por tanto un cuarto de longitud de onda corresponderá a 300m.

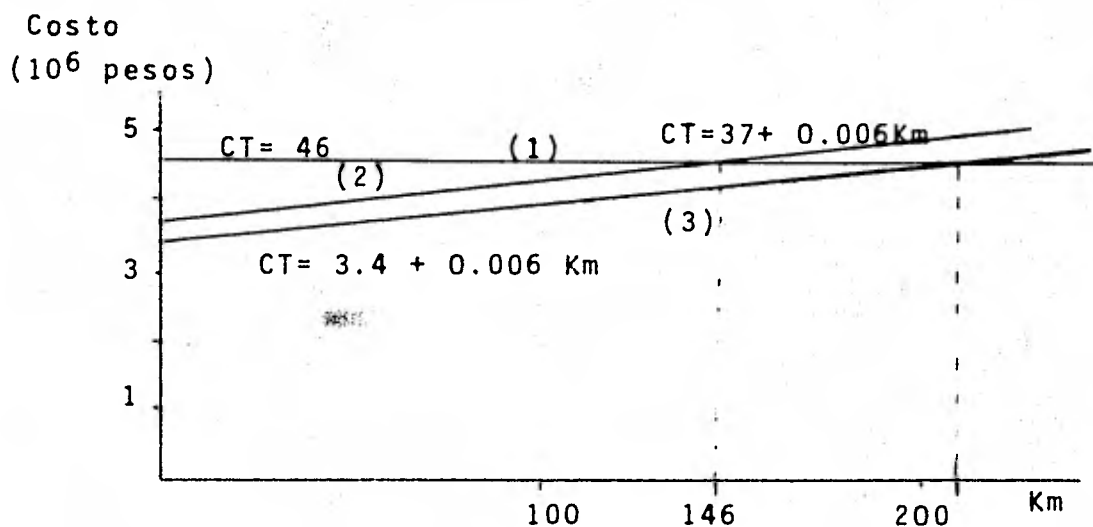


Por lo tanto, el costo total del sistema será :

$$CT = [ 3374 + 5.8/Km ] \times 10^3 \text{ PESOS}$$

## 4.4 COMPARACION ENTRE SISTEMAS

Para realizar la comparación económica de los sistemas, son graficados los costos de los sistemas en función de la distancia, como se muestra a continuación :



- (1) Sistema convencional OPLAT
- (2) Sistema OPSA con trampa de tap central.
- (3) Sistema OPSA con trampa de un cuarto de longitud de onda.

Figura 4.1

De la gráfica 4.1 se puede obtener el precio por canal ( en miles de pesos, 1980), en ambos sistemas, obteniéndose la siguiente tabla para distancias de 50,75,100, 125, 150, 175, 200, 225Km, para un equipo de 4 canales y una frecuencia portadora de 250KHz.

Sistema Distancia	OPLAT	OPSA Trampa Tap.	OPSA Trampa $\lambda/4$	RELACION DE COSTO OPSA/OPLAT	
				Trampa tap central	Trampa $\lambda/4$
25	1150	972	880	0.85	0.77
50	1150	1004	916	0.87	0.80
100	1150	1081	989	0.94	0.86
125	1150	1117	1025	0.97	0.89
150	1150	1153	1061	1.00	0.92
175	1150	1190	1097	1.03	0.95
200	1150	1226	1134	1.07	0.99
225	1150	1262	1170	1.10	1.02

T A B L A IV

Con los resultados obtenidos en la tabla IV, se procede a construir una gráfica que proporcione el costo por canal de los sistemas, incluyendo el costo del equipo de comunicación.

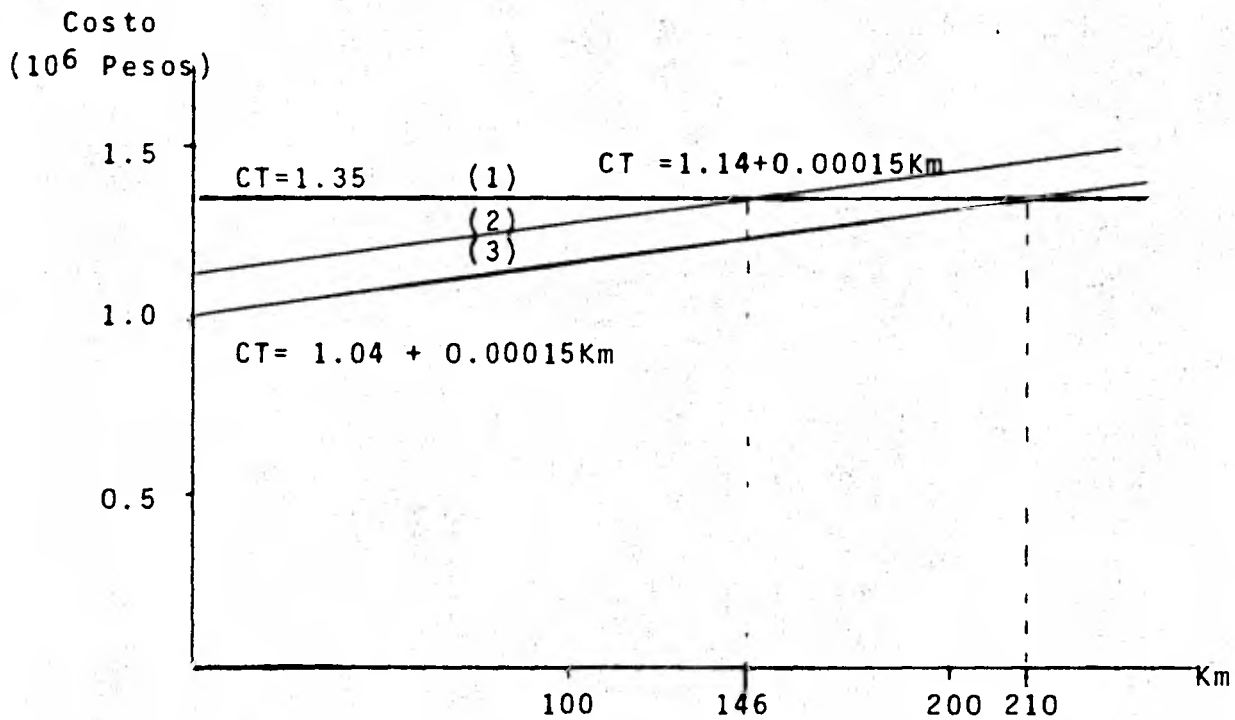


Figura 4.2

- (1) Sistema OPLAT
- (2) Sistema OPSA con trampa convencional
- (3) Sistema OPSA con trampa  $\lambda/4$

De las anteriores gráficas, se puede concluir que :

- 1) El costo de instalación y por canal del sistema OPSA resulta ser menor para distancias no mayores de 146 Km, cuando se utilizan equipos de acoplamiento con trampas de onda convencionales, con tap central.
- 2) Este mismo sistema resulta más económico para distancias

con longitudes iguales o menores a 210Km, cuando se utilizan las trampas de un cuarto de longitud de onda, para una frecuencia de trabajo de 250 KHz.

- 3) Al utilizar frecuencias de operación cada vez mayores, el costo del sistema OPSA, con trampas  $\lambda/4$ , resulta ser menor debido a que el acoplamiento efectuado a una distancia  $\lambda/4$  disminuye proporcionalmente a la frecuencia de operación.
- 4) El costo del sistema OPSA aumenta con la distancia del enlace.

Como ha mostrado este breve análisis económico, el sistema OPSA resulta ser menos costoso que el sistema convencional OPLAT, en líneas medianas ( < 150 Km). Esto, aunado a las ventajas que, como medio de comunicación, ofrece hacen atractiva la aplicación de OPSA en líneas de transmisión de 400KV, no mayores a la longitud mencionada.

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

1. Reporte final del estudio " HILO DE GUARDA AISLADO COMO MEDIO DE COMUNICACION " IIE - 1979.

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS DEL CAPITULO IV

I. F I G U R A S .

4.1 Costos de los sistemas OPSA y OPLAT.

4.2 Costo por canal de los sistemas OPSA y OPLAT.

II. T A B L A S.

- I. Costo de Equipo de Acoplamiento
- II. Costo de Equipo de Comunicación
- III. Costo de Componentes Mecánicos
- IV. Costo de los sistemas OPISA y OPLAT.



C A P I T U L O

V

C O N C L U S I O N E S

I N D I C E

		<u>PAGINA</u>
5.1	INTRODUCCION	3-V
5.2	CUADROS COMPARATIVOS Y CONCLUSIONES	4-V
5.3	COMENTARIOS FINALES	9-V

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

Una vez descritas en los anteriores capítulos las principales características que presentan los sistemas OPSA y OPLAT, en el presente capítulo se plantean las conclusiones que permiten conocer los beneficios que aporta la utilización del sistema OPSA en líneas de transmisión.

Con este fin, se elaboraron cuadros comparativos de las características técnicas y económicas de ambos sistemas y que son mostradas a continuación.

## 5.2 CUADROS COMPARATIVOS Y CONCLUSIONES

Con el propósito de realizar esta comparación en una forma más clara, las características técnicas y económicas de los sistemas OPESA y OPLAT son presentadas en cuatro cuadros comparativos, 3 de ellos correspondientes a las características técnicas y el último a los costos asociados a dichos sistemas.

a) Características de la Línea de Transmisión a Frecuencias de Portadora:

CARACTERISTICA	OPESA	OPLAT
IMPEDANCIA CARACTERISTICA ( $\Omega$ )	420	590
Atenuación (dB/Km) :		
100 KHz	0.065	0.088
300 KHz	0.12	0.244
400 KHz	0.15	0.331
NIVEL DE RUIDO CORONA RMS EN dB	.25	.25

Cuadro Comparativo 5.1 - Características de la línea de Transmisión a Frecuencias de Portadora.

Del cuadro 5.1, se puede concluir que :

- La impedancia característica que presenta el sistema OPESA tiene una magnitud menor que la del sistema OPLAT lo que facilita el acoplamiento entre el equipo de comunicación y la línea de alta tensión.

- . La atenuación de la señal de comunicación en sistemas con subconductores aislados resulta ser menor que la originada en el sistema OPLAT. Por tal motivo, puede pensarse que se requerirá menor potencia para la transmisión de portadoras o que, alternativamente, la señal podrá ser transmitida a mayores distancias, con la misma potencia de transmisión.
  - . El nivel de ruido corona generado en el sistema OPSA, presenta una magnitud similar al del sistema de onda portadora convencional. Por tanto, la utilización de cualquiera de estos sistemas afectará en igual forma la transmisión de la señal de comunicación en cuanto a ruido corona se refiere.
- b) Características de Comunicación de los sistemas OPSA Y OPLAT.

CARACTERISTICA	OPSA	OPLAT
Ancho de banda (KHz)	30-2500	30-500
Diafonía (dB)* :		
NEXT	60	--
FEXT	55	--
Campo de Radiación (dB)**	-32	--
Campo de Inducción (dB)**	-42	--

Cuadro Comparativo 5.2 - Características de comunicación de los sistemas OPLAT y OPSA.

\* En el sistema OPLAT no se presenta el fenómeno de diafonía, debido a que las tres fases de la línea constituyen un solo enlace de comunicación.

\*\* Los valores obtenidos, representan la relación entre las magnitudes de estos campos de los sistemas OPSA y OPLAT ( Ver sección 3.4).

El cuadro 5.2 muestra que :

- . El ancho de la banda del sistema OPSA es aproximadamente 5 veces mayor que el del sistema OPLAT. Esta ventaja hace posible la utilización de un mayor número de canales de comunicación en líneas de alta tensión. Por ejemplo, para el caso de utilizar canales con un ancho de banda de 4 KHz y una separación entre los mismos de 2.5 veces su ancho de banda ( 10 KHz), el cual es uno de los esquemas de asignación de frecuencias empleado actualmente, el sistema OPSA proporciona un total de 175 canales por fase.
- . Los bajos niveles de diafonía en líneas con subconductores aislados permiten la utilización simultánea de las 3 fases de una línea como enlaces individuales de comunicación. Por lo tanto, tomando en cuenta que una fase del sistema proporciona 175 canales, el empleo de las 3 fases de la línea ofrece un total de 525 canales, número suficiente para cubrir las necesidades de comunicación propias de las compañías generadoras de energía eléctrica.
- . Los bajos niveles de los campos de inducción y radiación emitidos por el sistema OPSA facilitan la asignación de frecuencias y minimizan la interferencia mutua con otros sistemas de comunicación externos a la línea.

c) Aplicaciones de los Sistemas OPSA y OPLAT

CARACTERISTICA	OPSA	OPLAT
Servicios de Comunicación.	Voz, Datos Teleprotección	Voz, Datos Teleprotección.

Cuadro comparativo 5.3 - Aplicaciones de los sistemas OPSA y OPLAT

- Del anterior cuadro se observa que los servicios de comunicación proporcionados por los sistemas OPSA y OPLAT, bajo las condiciones indicadas en la sección 3.10, son los mismos. Debido a ésto, es factible pensar que el empleo de sistemas con subconductores puede solucionar los requerimientos de comunicación presentados en los sistemas de potencia.

d) Costos de los sistemas OPSA y OPLAT :

CARACTERISTICA	COSTO POR CANAL ( MILES DE PESOS )		
	O P L A T	O P S A	
		Trampa con Derivación central	Trampa $\lambda/4$
50 Km	1350	1204	1116
100 Km	1350	1281	1189
150 Km	1350	1353	1261
200 Km	1350	1920	1334

Cuadro comparativo 5.4 - Costos de Sistemas OPSA y OPLAT

Finalmente, del anterior cuadro se concluye que :

- El costo por canal del sistema OPSA varía en función de

la longitud del enlace. En el caso de emplear equipo de acoplamiento con trampas con derivación central, el costo de este sistema será menor que el del sistema OPLAT a distancias menores de 146 Km, mientras que al emplear un acoplamiento con trampas de un cuarto de longitud de onda, el costo del sistema es menor para distancias menores a 210Km. En caso de utilizar este tipo de acoplamiento, el costo por canal también variará en función de la frecuencia de trabajo, ya que a mayores frecuencias el acoplamiento de un cuarto de longitud de onda será de menor longitud, reduciendo por tal motivo su costo.



### 5.3 COMENTARIOS FINALES

Los sistemas de potencia requieren de medios confiables de comunicación, para asegurar la adecuada transmisión de energía eléctrica. Como fué visto en el segundo capítulo de esta tesis, los sistemas OPLAT constituyen una alternativa muy limitada para la resolución de estas necesidades de comunicación, debiéndose esto principalmente a problemas asociados con el ancho de banda permisible, y a la reasignación de frecuencias. Debido a ésto, fué desarrollado el sistema OPSA, el cual representa una atractiva alternativa para la solución de los problemas de comunicación presentes en la transmisión de energía eléctrica.

Para una posible instalación de este sistema en la red eléctrica nacional, se sugiere construir una línea experimental para comprobar los resultados teóricos obtenidos, así como investigar aspectos en los cuales su comportamiento no ha sido definido claramente, tales como los niveles de ruido generado, y sus técnicas de medición. Asimismo, es deseable desarrollar nuevos prototipos de los elementos aislantes del sistema, que aseguren, a un mínimo costo, la propagación de señales de comunicación sin alterar el principal objetivo que es la transmisión de energía en líneas de alta tensión.

Una vez realizado ésto, las compañías generadoras de energía eléctrica (CFE en el caso de México), contarán con un sistema capaz de proporcionar un gran número de canales de gran confiabilidad para satisfacer su gran demanda, evitándose de esta forma, depender de servicios de comunicación ajenos a estas compañías.

