

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DEPARTAMENTO DE COMUNICACIONES

PROCEDIMIENTOS PARA MEDIR PÉRDIDAS EN LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Autores:

Docente:

Caropresse, Gerlis.

Br. López, Yonaikel.

Br. Rivero, Axel.

Br. Morales, Orlando.

Caracas. 3 de Octubre 2024

Índice

1. Introducción	3
2. Planteamiento del problema	4
2.1. Objetivo	4
2.2. Preguntas de investigación	4
2.3. Importancia	5
3. Descripción teórica	6
3.1. Líneas de transmisión	6
3.1.1. Ondas electromagnéticas transversales	6
3.1.2. Tipos de líneas de transmisión	7
3.1.3. Balunes	10
3.1.4. Líneas de transmisión de conductores paralelos	11
3.1.5. Líneas de transmisión concéntricas o coaxiales	13
3.1.6. Tabla de AWG	14
3.1.7. Circuito equivalente de una línea de transmisión	15
3.1.8. Propagación de ondas en línea de transmisión	19
3.1.9. Pérdidas en líneas de transmisión	21
3.1.10. Resistividad	23
4. Dispositivos	25
4.1. Medición de pérdidas en el conductor (Efecto Joule)	25
4.1.1. Medición de la caída de voltaje	25
4.1.2. Medición de la resistencia del conductor y cálculo de pérdidas	26
4.1.3. Medición directa de la potencia de entra y salida	27
4.1.4. Medición de la temperatura del conductor	27
4.1.5. Medición mediante técnicas de reflectometría (TDR)	28
4.1.6. Medición de pérdidas mediante análisis armónico	28
4.1.7. Medición con sensores en tiempo real (sensores de corriente y tensión)	29
4.1.8. Estrategias de mitigación	30
4.2. Medición de pérdidas por calentamiento del dieléctrico	30

4.2.1.	Probadores de Pérdida Dieléctrica	30
4.2.2.	Cámaras Termográficas	31
4.2.3.	Medidores de Factor de Potencia	32
4.2.4.	Medidores de Impedancia	33
4.2.5.	Estrategias de mitigación	34
4.3.	Medición de pérdidas por radiación	34
4.3.1.	Analizadores de Red Vectorial (VNA):	35
4.3.2.	Medidores de ROE (Relación de Onda Estacionaria)	36
4.3.3.	Analizadores de Espectro	37
4.3.4.	Cámaras Anecoicas	38
4.3.5.	Sondas de Campo Electromagnético	39
4.3.6.	Estrategias de mitigación	40
4.4.	Medición de pérdidas por acoplamiento	40
4.4.1.	Reflectómetro en el Dominio del Tiempo (TDR)	41
4.4.2.	Puentes de medición	42
4.4.3.	Osciloscopios de Alta Frecuencia	42
4.4.4.	Estrategias de mitigación	43
4.5.	Medición de pérdidas por efecto corona	44
4.5.1.	Detectores de Fallos de Arco (AFDD)	44
4.5.2.	Medidores de Descarga Parcial	45
4.5.3.	Sensores de Campo Eléctrico	46
4.5.4.	Estrategias de mitigación	47
5.	Propuesta de diseño	48
5.1.	Demostración	48
5.2.	Proceso	48
6.	Simulaciones	50
6.1.	Código en Python para la simulación de pérdidas resistivas	50
7.	Conclusiones y posibles aplicaciones	52

1. Introducción

Las líneas de transmisión eléctricas juegan un papel fundamental en la infraestructura energética moderna, permitiendo la transferencia eficiente de energía desde los centros de generación hasta los puntos de consumo. No obstante, el diseño y la operación de estas líneas presentan una serie de desafíos técnicos que deben ser abordados para optimizar su rendimiento y minimizar las pérdidas de energía. Entre los principales problemas se encuentran las diversas pérdidas de energía que ocurren durante la transmisión, lo que puede reducir la cantidad de energía útil que llega al destino.

Existen varios tipos de pérdidas en las líneas de transmisión, entre las cuales se destacan las pérdidas resistivas, las pérdidas por radiación, las pérdidas por calentamiento del dieléctrico y las pérdidas por efecto corona. Las pérdidas resistivas, ocurren debido a la resistencia inherente de los materiales conductores y están directamente relacionadas con la longitud de la línea y la corriente que fluye a través de ella. Por otro lado, las pérdidas por radiación y calentamiento del dieléctrico son más prominentes a frecuencias más altas y pueden reducirse mediante el uso de materiales adecuados y técnicas de blindaje. El efecto corona, que ocurre principalmente en líneas de alta tensión, genera pérdidas significativas de energía debido a la ionización del aire alrededor de los conductores.

Este trabajo tiene como objetivo analizar las pérdidas resistivas en los conductores más utilizados en líneas de transmisión: cobre, aluminio y oro. Para ello, se ha implementado una simulación en Python, donde se modelan los efectos de la resistividad, el diámetro del conductor y la corriente sobre las pérdidas de energía. Los resultados obtenidos permitirán proponer soluciones viables para mejorar la eficiencia de las líneas de transmisión, enfocándose en la reducción de las pérdidas de potencia.

Además, se evaluarán métodos para medir y mitigar las pérdidas mencionadas, brindando una visión más completa de las diferentes estrategias de optimización disponibles. Finalmente, se presentarán propuestas de diseño que permitan aumentar la eficiencia de las líneas de transmisión, siempre considerando la viabilidad técnica y económica de cada opción.

2. Planteamiento del problema

Las líneas de transmisión son esenciales en la distribución de energía eléctrica desde los generadores hasta los consumidores. Sin embargo, durante este proceso, se producen diversas pérdidas que afectan la eficiencia del sistema de transmisión. Estas pérdidas no solo representan un costo económico significativo, sino que también impactan la estabilidad y confiabilidad del suministro eléctrico. Es crucial entender y mitigar estas pérdidas para mejorar la eficiencia energética y reducir los costos operativos.

En el ámbito de la transmisión de energía, se identifican varios tipos de pérdidas que ocurren debido a diferentes factores:

1. Pérdida en el conductor.
2. Pérdida por calentamiento del dieléctrico.
3. Pérdida por radiación.
4. Pérdida por acoplamiento.
5. Efecto corona.

2.1. Objetivo

El objetivo de este estudio es investigar y analizar los procedimientos para medir cada uno de los tipos de pérdidas mencionados en las líneas de transmisión de energía. Además, se diseñará un montaje práctico en un laboratorio para medir uno de estos tipos de pérdidas, proporcionando así una metodología clara y precisa para su evaluación.

2.2. Preguntas de investigación

- ¿Cuáles son los procedimientos más efectivos para medir la pérdida en el conductor en las líneas de transmisión?
- ¿Cómo se pueden cuantificar las pérdidas por calentamiento del dieléctrico?
- ¿Qué métodos se utilizan para medir la pérdida por radiación en diferentes condiciones de transmisión?

- ¿Qué técnicas existen para evaluar las pérdidas por acoplamiento entre líneas de transmisión?
- ¿Cómo se puede medir y mitigar el efecto corona en las líneas de transmisión?

2.3. Importancia

Este estudio es crucial para mejorar la eficiencia de los sistemas de transmisión de energía eléctrica. Al identificar y cuantificar adecuadamente las diversas pérdidas, se pueden desarrollar estrategias más efectivas para mitigarlas.

3. Descripción teórica

Este trabajo se basa completamente en los libros de [1] y [2].

3.1. Líneas de transmisión

Una línea de transmisión es un sistema de conductores metálicos para transferir energía eléctrica de un punto a otro. En forma más específica, una línea de transmisión consiste en dos o más conductores separados por un aislador, como por ejemplo un par de alambres o un sistema de pares de alambres. Una línea de transmisión puede tener desde unas pocas pulgadas hasta varios miles de millas de longitud. Se pueden usar las líneas de transmisión para propagar cd o ca de baja frecuencia, como la corriente eléctrica de 60 ciclos y las señales de audio; también se pueden usar para propagar frecuencias muy altas, como las señales de frecuencia intermedia y de radiofrecuencia. Cuando propagan señales de baja frecuencia, el comportamiento de una línea de transmisión es bastante sencillo y muy predecible; sin embargo, cuando propagan señales de alta frecuencia se complican las características de las líneas de transmisión, y su comportamiento es algo especial para un estudiante de circuitos y sistemas de elementos concentrados y constantes.

3.1.1. Ondas electromagnéticas transversales

La propagación de la energía eléctrica por una línea de transmisión se hace en forma de ondas electromagnéticas transversales (EMT). Una onda es un movimiento oscilatorio. La vibración de una partícula excita vibraciones semejantes en las partículas vecinas. Una onda EMT se propaga principalmente en el no conductor (dieléctrico) que separa los dos conductores de una línea de transmisión. En consecuencia, la onda viaja, o se propaga, a través de un medio. Para una onda transversal, la dirección del desplazamiento es perpendicular a la dirección de propagación. Una onda superficial de agua es una onda longitudinal. Una onda en la que el desplazamiento tiene la dirección de propagación se llama onda longitudinal. Las ondas sonoras son longitudinales. Una onda electromagnética (EM) se produce por la aceleración de una carga eléctrica. En un conductor, la corriente y el voltaje siempre se acompañan por un campo eléctrico E y un campo magnético H en la región vecina del espacio. La fig. 1-a muestra las relaciones espaciales entre los campos E y H de una onda electromagnética. En la fig. 1-b se ven los cortes transversales de los campos E y H que rodean a una línea de dos alambres paralelos.

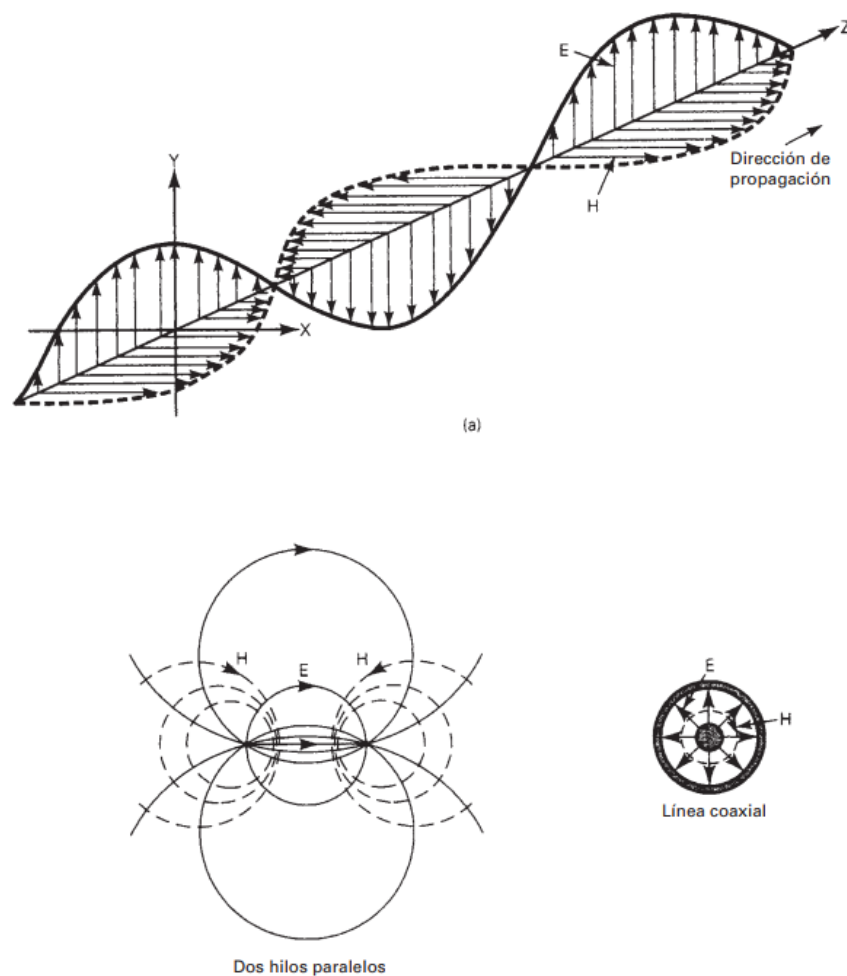


Figura 1: Vistas: (a) en perspectiva; (b) transversal indicando el desplazamiento relativo de los campos E y H en una línea de transmisión

3.1.2. Tipos de líneas de transmisión

En general, las líneas de transmisión se pueden clasificar en:

- **Balanceadas**
- **Desbalanceadas**

1. Balanceadas: En las líneas balanceadas de dos alambres ambos conductores llevan corriente; uno lleva la señal y el otro es el regreso. Este tipo de transmisión se llama transmisión diferencial o balanceada de señal. La señal que se propaga por el alambre se mide como diferencia de potencial entre los dos conductores.

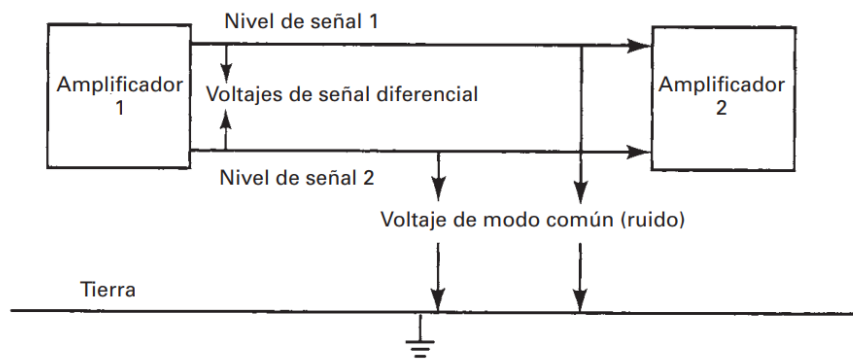


Figura 2: Sistema de transmisión diferencial o balanceado

La fig. 2 muestra un sistema de transmisión balanceado. Ambos conductores de una línea balanceada conducen corriente de señal, y las corrientes tienen igual magnitud con respecto a la masa o tierra eléctrica, pero viajan en direcciones opuestas. Las corrientes que fluyen en direcciones opuestas en un par balanceado de alambres se llaman corrientes de circuito metálico. Las corrientes que tienen las mismas direcciones se llaman corrientes longitudinales. Un par balanceado de alambres tiene la ventaja de que la mayor parte del ruido de interferencia (que a veces se llama voltaje de modo común) se induce por igual en ambos conductores, y produce corrientes longitudinales que se anulan en la carga. La anulación de las señales de modo común se llama rechazo de modo común (CMR, de common-mode rejection). Son comunes las relaciones de rechazo de modo común (CMRR, de common-mode rejection ratio) de 40 a 70 dB.

Todo par de alambres puede trabajar en el modo balanceado, siempre que ninguno de ellos esté al potencial de tierra. Aquí se incluye el cable coaxial que tiene dos conductores centrales y un blindaje. En general, el blindaje se conecta a tierra para evitar que la interferencia estática penetre a los conductores centrales.

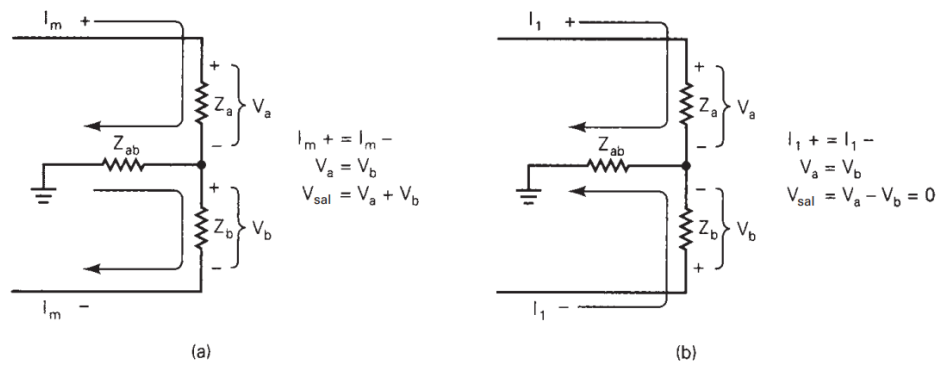


Figura 3: Resultados de corrientes metálicas y longitudinales en una línea de transmisión balanceada: (a) corrientes metálicas debidas a voltajes de señal; (b) corrientes longitudinales debidas a voltajes de ruido

La fig. 3 muestra el resultado de las corrientes metálicas y longitudinales en una línea de transmisión. Se ve que las corrientes longitudinales, que se producen con frecuencia debido a la interferencia de estática, se anulan en la carga.

2. Desbalanceadas: En una línea de transmisión desbalanceada, un alambre está al potencial de tierra, mientras que el otro tiene el potencial de una señal. A este tipo de transmisión se le llama transmisión de señal desbalanceada o asimétrica. En la transmisión desbalanceada, el alambre de tierra puede ser también la referencia para otros conductores portadores de señal. Si éste es el caso, el alambre de tierra debe ir donde vaya cualquiera de los conductores de señal. A veces esto origina problemas, porque un tramo de alambre tiene resistencia, inductancia y capacitancia y, en consecuencia, puede existir una pequeña diferencia de potencial entre dos puntos cualesquiera en el conductor de tierra. En consecuencia, ese conductor no es un punto de referencia perfecto, y puede tener ruido inducido en él. Un cable coaxial normal de dos conductores es una línea desbalanceada. El segundo conductor es el blindaje, que casi siempre se conecta a tierra.

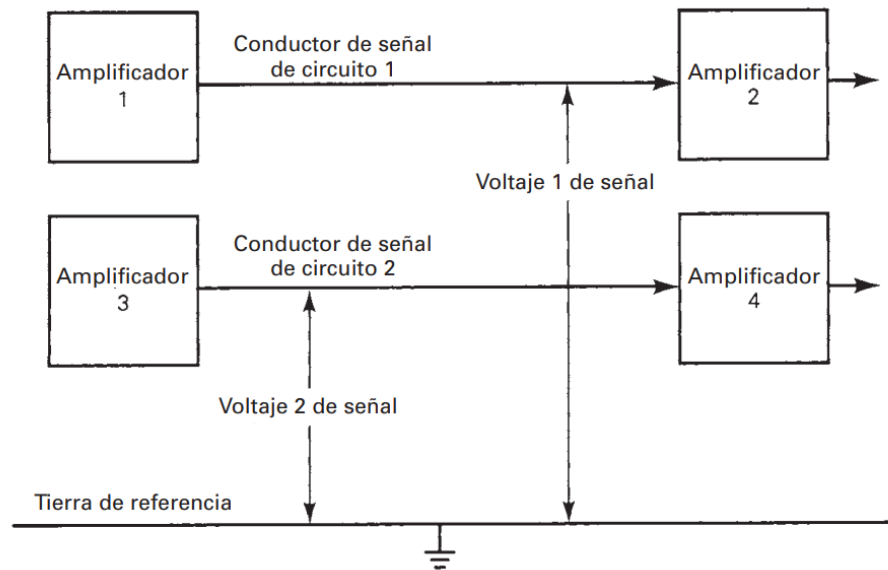


Figura 4: Sistema de transmisión asimétrico o desbalanceado

La fig. 4 muestra dos sistemas desbalanceados de transmisión. La diferencia de potencial en cada alambre de señal se mide entre él y la tierra. Las líneas de transmisión balanceadas se pueden conectar a líneas desbalanceadas, y viceversa, con transformadores especiales llamados balunes.

3.1.3. Balunes

Un dispositivo que se usa para conectar una línea de transmisión balanceada con una carga desbalanceada se llama balún (balanceado a desbalanceado, de balanced to unbalanced). También, lo que es más común, una línea de transmisión desbalanceada, como un cable coaxial, se puede conectar con una carga balanceada, como una antena, mediante un transformador especial con desbalanceado primario y devanado secundario con toma central. El conductor externo (blindaje) de una línea de transmisión desbalanceada se suele conectar a tierra. A frecuencias relativamente bajas se puede usar un transformador ordinario para aislar la tierra de la carga, como se ve en la fig. 5-a. El balún debe tener un blindaje electrostático conectado a tierra física, para reducir al mínimo los efectos de las capacitancias parásitas.

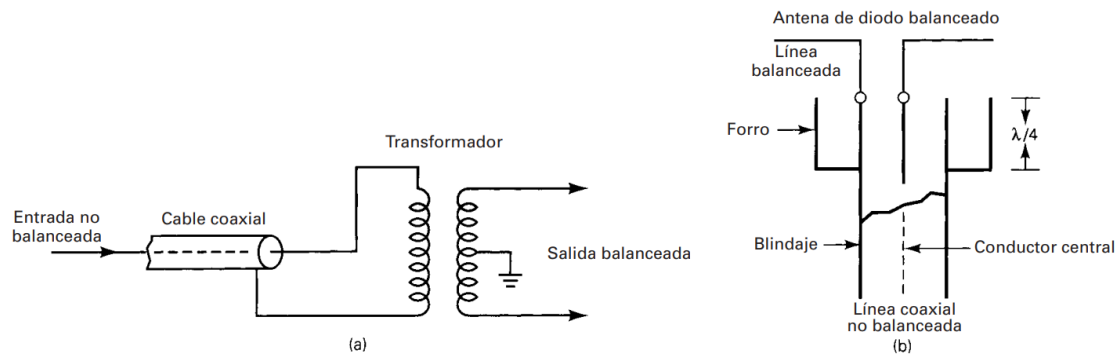


Figura 5: Balunes: (a) balún de transformador; (b) balún de bazuca

Cuando las frecuencias son relativamente altas se usan balunes de varios tipos para líneas de transmisión. El más común es el balún de banda angosta, que a veces se llama choke, forro o balún bazuca, y se ve en la fig. 8-6b. Un choke de cuarto de onda se instala en torno al conductor externo de un cable coaxial y se conecta con él. Así, la impedancia que se ve hacia la línea de transmisión se forma por el choke y el conductor externo, y es igual a infinito, es decir, el conductor externo ya no tiene impedancia cero a tierra. Por lo anterior, un alambre del par balanceado se puede conectar con el choke sin poner en corto la señal. El segundo conductor se conecta al conductor interno del cable coaxial.

3.1.4. Líneas de transmisión de conductores paralelos

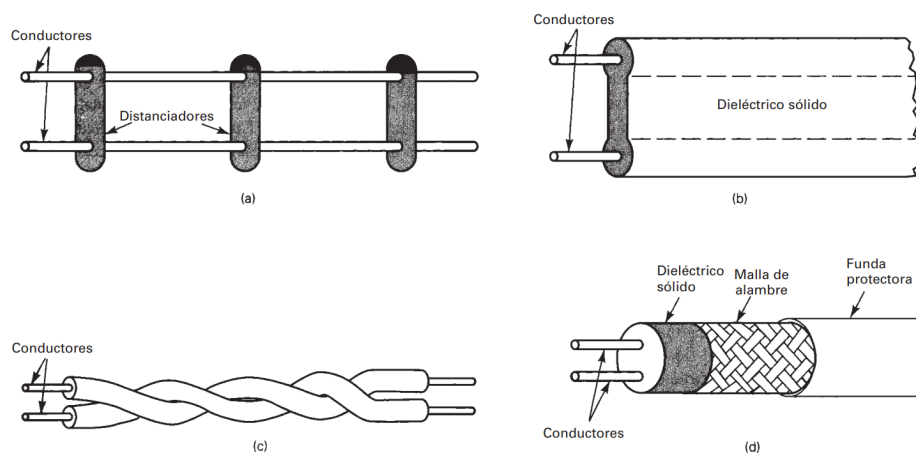


Figura 6: Líneas de transmisión: (a) alambres desnudos; (b) conductores gemelos; (c) par trenzado; (d) par blindado

a. Línea de transmisión de alambre desnudo: Una línea de transmisión de alambre desnudo es un conductor de dos alambres paralelos; se ve en la fig. 6-a. Consiste simplemente en

dos alambres paralelos a corta distancia y separados por aire. Se colocan espaciadores no conductores a intervalos periódicos, para sostenerlos y mantener constante la distancia entre ellos. La distancia entre los dos conductores en general es entre 2 y 6 pulgadas. El dieléctrico no es más que el aire entre y en torno a los dos conductores en los que se propaga la EMT. La única ventaja real de este tipo de línea de transmisión es su construcción sencilla. Como no tiene blindaje, las pérdidas por radiación son altas y es susceptible de captar ruido. Son las principales desventajas de una línea de transmisión de cable desnudo. Por consiguiente, estas líneas se trabajan normalmente en el modo balanceado.

b. Conductores gemelos: Los conductores gemelos son otra forma de línea de transmisión de dos alambres paralelos, y se ve en la fig. 6-b. A los conductores gemelos también se les llama con frecuencia cable de cinta. Los conductores gemelos son, en esencia, lo mismo que la línea de transmisión de conductores desnudos, pero los distanciadores entre los dos conductores se reemplazan con un dieléctrico macizo continuo. Así se asegura la distancia uniforme a lo largo de todo el cable, lo cual es una buena característica. En forma normal, la distancia entre los dos conductores es 5/16 de pulgada para el cable de transmisión de TV. Los materiales dieléctricos más frecuentes son el teflón y el polietileno.

c. Cable de par trenzado: Un cable de par trenzado se forma torciendo entre sí dos conductores aislados. Con frecuencia, los pares se trenzan en unidades y las unidades se llevan en núcleos que a su vez se cubren con varios tipos de forros, dependiendo de la aplicación. Los pares vecinos se trenzan con distintos pasos (longitud de torcimiento) para reducir la interferencia debida a la inducción mutua entre los pares. Las constantes primarias del cable de par trenzado son sus parámetros eléctricos: resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia, que están sujetas a variaciones de acuerdo con el ambiente físico, como temperatura, humedad y esfuerzos mecánicos, y dependen de las diferencias de manufactura. En la fig. 6-c se muestra un cable de par trenzado.

d. Par de cable blindado: Para reducir las pérdidas por radiación y la interferencia, con frecuencia las líneas de transmisión se encierran en una malla de alambre metálica y conductora. La malla se conecta a tierra y funciona como blindaje. También, la malla evita que se irradien señales fuera de ella, y evita que la interferencia electromagnética llegue a los conductores de señal. En la fig. 6-d se ve un par de cable blindado. Está formado por dos alambres conductores

paralelos separados por un material dieléctrico macizo. Toda la estructura se encierra en un tubo de conductor integrado por una malla, y después se cubre con una capa protectora de plástico.

3.1.5. Líneas de transmisión concéntricas o coaxiales

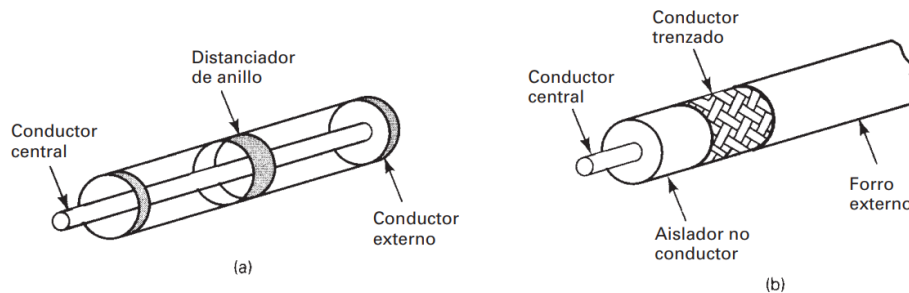


Figura 7: Líneas de transmisión concéntricas o coaxiales: (a) rígida llena de aire; (b) línea maciza flexible

Las líneas de transmisión de conductores paralelos son adecuadas para aplicaciones en baja frecuencia. Sin embargo, con las **altas frecuencias aumentan demasiado sus pérdidas por radiación y en dieléctrico, así como su susceptibilidad a la interferencia externa**. Por lo anterior, **se usan mucho los conductores coaxiales** en aplicaciones de alta frecuencia, **para reducir las pérdidas y para aislar las trayectorias de transmisión**. El cable coaxial básico consiste en un conductor central rodeado por un conductor externo concéntrico, a distancia uniforme del centro. A frecuencias de trabajo relativamente altas, el conductor externo coaxial proporciona un excelente blindaje contra la interferencia externa. Sin embargo, no es económico usar un blindaje con frecuencias relativamente bajas. También, casi siempre el conductor externo de un cable coaxial se conecta a tierra, y eso limita su empleo a aplicaciones desbalanceadas o asimétricas.

En esencia hay dos tipos de cables coaxiales: líneas rígidas llenas de aire o líneas flexibles macizas. La fig. 7-a muestra una línea coaxial rígida de aire. Se ve que el conductor central está coaxialmente rodeado por un conductor externo tubular, y que el material aislador es aire. El conductor externo está aislado físicamente, y separado del conductor central por un espaciador, que puede ser de vidrio pyrex, poliestireno o algún otro material no conductor. La fig. 7-b representa un cable coaxial flexible y macizo. El conductor externo es una malla de alambre flexible, y es coaxial respecto al conductor central. El material aislante es polietileno macizo no conductor, que proporciona tanto soporte como aislamiento eléctrico entre los conductores

interno y externo. El conductor interno es un alambre flexible de cobre, que puede ser macizo o hueco.

Es relativamente costoso fabricar los cables coaxiales rígidos de aire, y para minimizar las pérdidas, el aislador de aire debe estar relativamente libre de humedad. Los cables coaxiales macizos tienen menos pérdidas y son más fáciles de fabricar, instalar y mantener. Los dos tipos de cable coaxial son relativamente inmunes a la radiación externa, irradian poco ellos mismos, y pueden funcionar a mayores frecuencias que sus contrapartes de conductores paralelos. Las desventajas básicas de las líneas coaxiales de transmisión son su alto costo y que se deben usar en el modo desbalanceado.

3.1.6. Tabla de AWG

El sistema AWG en cables eléctricos, significa American Wire Gauge, traduciendo al español es el Calibre de Alambre Estadounidense. Los cables de estándar AWG son para uso residencial y su aplicación data desde 1857, en particular es para conductores redondos, sólidos no ferrosos.

En el sistema AWG mientras mayor sea el número, más delgado es el hilo del diámetro, ya que el calibre nos indica el número de veces que el metal necesita ser sometido a las hileras de trefilado para llegar al diámetro deseado. Y los números más bajos son para indicar cables más gruesos. Por ejemplo, el cable 4 AWG es más grueso que el cable 18 AWG. Son 44 los tamaños que se encuentran estandarizados en sistema AWG.

Número AWG	Diámetro (mm)	Sección (mm ²)	Número espiras por cm.	Kg. por Km.	Resistencia (Ohm/Km.)	Capacidad (A)
0000	11,86	107,2			0,158	319
000	10,40	85,3			0,197	240
00	9,226	67,43			0,252	190
0	8,252	53,48			0,317	150
1	7,348	42,41		375	1,40	120
2	6,544	33,63		295	1,50	96
3	5,827	26,67		237	1,63	78
4	5,189	21,15		188	0,80	60
5	4,621	16,77		149	1,01	48
6	4,115	13,30		118	1,27	38
7	3,665	10,55		94	1,70	30
8	3,264	8,36		74	2,03	24
9	2,906	6,63		58,9	2,56	19
10	2,588	5,26		46,8	3,23	15
11	2,305	4,17		32,1	4,07	12
12	2,053	3,31		29,4	5,13	9,5
13	1,828	2,63		23,3	6,49	7,5
14	1,628	2,08	5,6	18,5	8,17	6,0
15	1,450	1,65	6,4	14,7	10,3	4,8
16	1,291	1,31	7,2	11,6	12,9	3,7
17	1,150	1,04	8,4	9,26	16,34	3,2
18	1,024	0,82	9,2	7,3	20,73	2,5
19	0,9116	0,65	10,2	5,79	26,15	2,0
20	0,8118	0,52	11,6	4,61	32,69	1,6
21	0,7230	0,41	12,8	3,64	41,46	1,2
22	0,6438	0,33	14,4	2,89	51,5	0,92
23	0,5733	0,26	16,0	2,29	56,4	0,73
24	0,5106	0,20	18,0	1,82	85,0	0,58
25	0,4547	0,16	20,0	1,44	106,2	0,46
26	0,4049	0,13	22,8	1,14	130,7	0,37
27	0,3606	0,10	25,6	0,91	170,0	0,29

Figura 8: Valores normalizados de cables AWG

3.1.7. Circuito equivalente de una línea de transmisión

Líneas uniformemente distribuidas: Las características de una línea de transmisión están determinadas por sus propiedades eléctricas, como por ejemplo la conductividad de los alambres y la constante dieléctrica del aislamiento, y de sus propiedades físicas, como diámetro del alambre y distancia entre conductores. Estas propiedades, a su vez, determinan las constantes eléctricas primarias: resistencia de cd en serie (**R**), inductancia en serie (**L**), capacitancia en paralelo (**C**) y conductancia en paralelo (**G**). A lo largo de la línea hay resistencia e inductancia, mientras que entre los dos conductores se desarrollan capacitancia y conductancia. Las constantes primarias se distribuyen uniformemente en toda la longitud de la línea y, en consecuencia, se les llama parámetros distribuidos. Para simplificar el análisis, los parámetros distribuidos se agrupan entre sí por unidad de longitud, para formar un modelo eléctrico artificial de la línea. Por ejemplo, la resistencia en serie se especifica en general en ohms por unidad de longitud (por ejemplo, ohms por metro).

La fig. 9 muestra el circuito eléctrico equivalente de una línea de transmisión metálica de dos conductores, donde se muestra la colocación relativa de los diversos parámetros agrupados. La conductancia entre los dos alambres se muestra en su forma recíproca, y se menciona como

resistencia de fugas en paralelo, R_s .

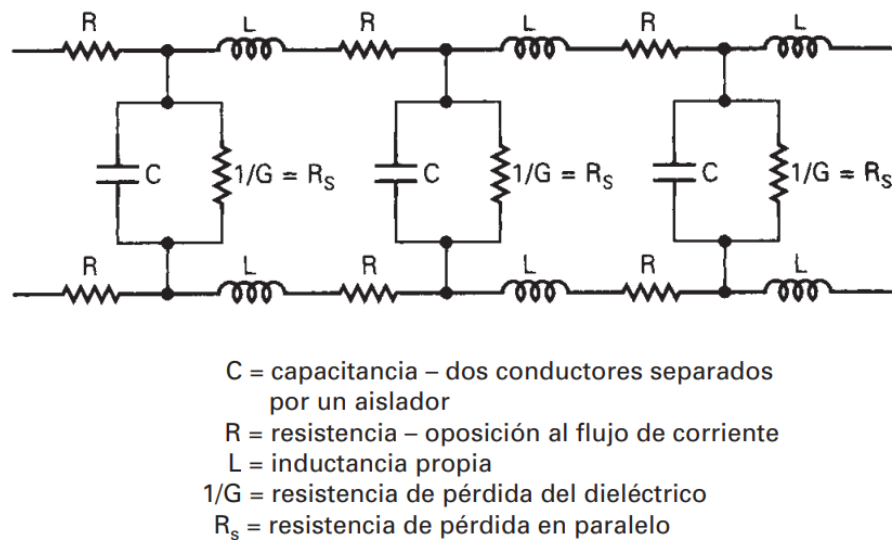


Figura 9: Línea de transmisión de dos hilos paralelos; circuito eléctrico equivalente y modela las pérdidas

Características de transmisión: Las características de transmisión de una línea se llaman constantes secundarias, y se calculan a partir de las cuatro constantes primarias. Las constantes secundarias son la impedancia característica y la constante de propagación.

■ Impedancia característica

Para que haya una transferencia máxima de energía de la fuente a la carga, es decir, que no haya energía reflejada, una línea de transmisión debe terminar en una carga puramente resistiva, igual a la impedancia característica de ella. La impedancia característica, Z_o , de una línea de transmisión es una cantidad compleja que se expresa en ohms, y que en el caso ideal es independiente de la longitud de la línea y que no se puede medir.

Esa impedancia característica, se define como la impedancia vista hacia una línea de longitud infinita, o la impedancia vista hacia una línea de longitud finita que termina en una carga puramente resistiva igual a la impedancia característica de la línea. Una línea de transmisión almacena energía en su inductancia y capacitancia distribuidas. Si la línea es infinitamente larga, puede almacenar energía en forma indefinida; la energía procede de la fuente, entra a la línea y nada regresa. Por lo mismo, la línea funciona como un resistor que disipa toda la energía. Se puede simular una línea infinita si una línea finita

termina en una carga puramente resistiva igual a Z_o ; toda la energía que entra de la fuente a la línea se disipa en la carga (esto supone que la línea es totalmente sin pérdidas).

■ Constante de propagación

La constante de propagación, que a veces se le llama coeficiente de propagación se usa para expresar **la atenuación (pérdida de señal)** y el desplazamiento de fase por unidad de longitud de una línea de transmisión. Cuando una onda se propaga por una línea de transmisión disminuye su amplitud con la distancia recorrida. **Se usa la constante de propagación para determinar la reducción de voltaje o de corriente con la distancia, cuando una onda EMT se propaga por una línea de transmisión.** Cuando la línea es de longitud infinita, toda la potencia incidente se disipa en la resistencia del conductor al avanzar la onda por la línea. Por consiguiente, con una línea de longitud infinita, o una que se vea infinitamente larga, como puede ser una línea finita terminada en una carga equilibrada ($Z_o = Z_L$), no regresa o se refleja energía alguna hacia la fuente.

La ecuación de la constante de propagación es:

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (1)$$

Siendo,

γ = constante de propagación

α = coeficiente de atenuación (nepers por unidad de longitud)

β = coeficiente de desplazamiento de fase (radianes por unidad de longitud)

La constante de propagación es una cantidad compleja y se define como sigue

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (2)$$

Como en cada distancia igual a la longitud de onda se produce un desplazamiento de fase de 2π ,

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3)$$

A frecuencias intermedias y de radio, $\omega L > R$ y $\omega C > G$, entonces

$$\alpha = \frac{R}{2Z_o} + \frac{GZ_o}{2} \quad (4)$$

$$\beta = \omega\sqrt{LC} \quad (5)$$

La distribución de corriente y voltaje a lo largo de una línea de transmisión que termina en una carga igual a su impedancia característica (una línea equilibrada) se calculan con las siguientes fórmulas

$$I = I_s e^{-l\gamma} \quad (6)$$

$$V = V_s e^{-l\gamma} \quad (7)$$

En las que,

I_s = corriente en el extremo de la línea que da la fuente (amp)

V_s = voltaje en el extremo de la línea que da la fuente (volts)

γ = constante de propagación

l = distancia de la fuente hasta donde se determina la corriente o el voltaje

Para una carga equilibrada $Z_L = Z_o$ y para determinada longitud de cable l , la pérdida de voltaje o corriente de señal es la parte real de γl , y el desplazamiento de fase es la parte imaginaria.

3.1.8. Propagación de ondas en línea de transmisión

Las ondas electromagnéticas viajan a la velocidad de la luz cuando se propagan en el vacío, y casi a la velocidad de la luz cuando lo hacen a través del aire. Sin embargo, en las líneas metálicas de transmisión, donde el conductor suele ser cobre, y en los materiales dieléctricos, la velocidad varía mucho de acuerdo con el tipo de cable, y una onda electromagnética viaja con mucha mayor lentitud.

Factor de velocidad El factor de velocidad (llamado a veces constante de velocidad) se define como la relación de la velocidad real de propagación a través de determinado medio, entre la velocidad de propagación a través del espacio vacío. La definición matemática del factor de velocidad es:

$$V_f = \frac{V_p}{c} \quad (8)$$

donde,

V_f = factor de velocidad (adimensional)

V_p = Velocidad real de propagación (metros por segundo)

c = Velocidad de propagación a través del espacio vacío ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

$$\text{y } V_f \times c = V_p$$

La velocidad a la que viaja una onda electromagnética por una línea de transmisión depende de la constante dieléctrica del material aislante que separa a los dos conductores. El factor de velocidad se calcula en forma muy aproximada con la fórmula:

$$V_f = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (9)$$

en la que ϵ_r es la constante dieléctrica del material dado (la permitividad del material en relación con la permitividad en el vacío; es la misma relación $\frac{\epsilon}{\epsilon_o}$).

La constante dieléctrica es tan sólo la permitividad relativa de un material.

La constante dieléctrica depende del material que se use. Los inductores almacenan energía magnética, y los capacitores almacenan energía eléctrica. Se necesita un tiempo finito para que un inductor o un capacitor tome o ceda energía. Por consiguiente, la velocidad con la que se propaga una onda electromagnética por una línea de transmisión varía de acuerdo con la inductancia y la capacitancia. Se puede demostrar que ese tiempo de carga es $T = \sqrt{LC}$. Así, la inductancia, capacitancia y velocidad de propagación se relacionan mediante la fórmula

$$\text{Velocidad} \times \text{tiempo} = \text{distancia}$$

Por consiguiente,

$$V_p = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}} = \frac{D}{T}$$

$$\text{Al Sustituir el tiempo se obtiene } V_p = \frac{D}{\sqrt{LC}}$$

Si la distancia se normaliza a 1 m, la velocidad de propagación de una línea sin pérdidas es

$$V_p = \frac{1 \text{ m}}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ m/s} \quad (10)$$

donde V_p = velocidad de propagación (metros por segundo)

$$\sqrt{LC} = \text{segundos}$$

Líneas de retardo Las líneas de retardo son líneas de transmisión diseñadas en forma intencional para introducir un retardo de tiempo en la trayectoria de una onda electromagnética. La cantidad de retardo es función de la inductancia y la capacitancia de la línea de transmisión. La inductancia se opone a cambios de corriente, al igual que los tiempos de carga y descarga de la capacitancia. El retardo se calcula como sigue:

$$t_d = LC \text{ (segundos)} \quad (11)$$

donde t_d = retardo (segundos)

L = inductancia (henrys)

C = capacitancia (farads)

Si la inductancia y la capacitancia se expresan por unidad de longitud de línea de transmisión, por ejemplo por metro o por pie, el retardo también será por unidad de longitud; por ejemplo, 1.5 ns/metro. La demora introducida por un tramo de cable coaxial se calcula con la siguiente fórmula:

$$t_d = 1,016 \epsilon \quad (12)$$

en la que ϵ es la constante dieléctrica del cable.

3.1.9. Pérdidas en líneas de transmisión

Para fines de análisis, las líneas de transmisión se consideran, con frecuencia, sin pérdidas. Sin embargo, en realidad hay varias formas en las que se pierde la energía en una línea de transmisión. Están las pérdidas en el conductor, pérdidas por radiación, pérdidas por calentamiento del dieléctrico, pérdidas por acoplamiento y efecto de corona.

Pérdidas en el conductor Como la corriente pasa por una línea de transmisión, y ésta tiene una resistencia finita, hay una pérdida inherente e inevitable de potencia. A veces a esto se le llama pérdida en el conductor o pérdida por calentamiento del conductor, y es tan sólo una pérdida de la forma $I^2 R$. Como la resistencia está distribuida en una línea de transmisión, la pérdida en el conductor es directamente proporcional a la longitud de la línea. También, ya que la disipación de potencia es directamente proporcional al cuadrado de la corriente, la pérdida en el conductor es inversamente proporcional a la impedancia característica. Para reducir las pérdidas en el conductor no hay más que acortar la línea de transmisión o usar un alambre de mayor diámetro (téngase en cuenta que al cambiar el diámetro del alambre también cambia la impedancia característica y, en consecuencia, la corriente).

La pérdida en el conductor depende algo de la frecuencia, debido a una acción llamada efecto de superficie. Cuando pasa la corriente por un alambre redondo aislado, el flujo magnético asociado con ella tiene la forma de círculos concéntricos. Esto se ve en la fig. 10. Se puede demostrar que la densidad de flujo cerca del centro del conductor es mayor que cerca de la superficie. Entonces, las líneas de flujo cercanas al centro del conductor encierran la corriente y reducen la movilidad de los electrones encerrados. Es una forma de autoinductancia, y hace que la inductancia cercana al centro del conductor sea mayor que en la superficie. Así, en las radiofrecuencias, la mayor parte de la corriente pasa por la superficie y no cerca del centro del conductor. Esto equivale a reducir el área transversal del conductor, y a aumentar la oposición al flujo de corriente (es decir, a aumentar la resistencia). La oposición adicional tiene ángulo de fase igual a 0° , y en consecuencia es una resistencia, y no una reactancia. Así, la resistencia en ca del conductor es proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia. La relación de la resistencia en ca entre la resistencia en cd de un conductor se llama relación de resistencias. Arriba de más o menos 100 MHz, se puede eliminar por completo el centro de un conductor, sin tener absolutamente efecto alguno sobre la pérdida en el conductor o la propagación de la onda electromagnética.

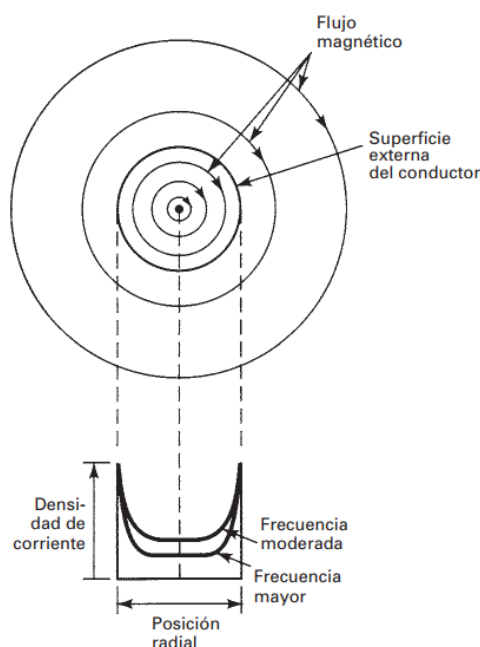


Figura 10: Conductor redondo aislado mostrando las líneas de flujo magnético, distribución de corrientes y el efecto de superficie

Las pérdidas en el conductor, en las líneas de transmisión, varía desde una fracción de

decibel por 100 m en los cables coaxiales rígidos con dieléctrico de aire, hasta 200 dB por 100 m en una línea flexible de dieléctrico rígido. Tanto las pérdidas I^2R como las del dieléctrico son proporcionales a la longitud, con frecuencia se agrupan y se expresan en decibeles de pérdida por unidad de longitud, es decir, dB/m.

Pérdida por calentamiento del dieléctrico Una diferencia de potencial entre los dos conductores de una línea de transmisión causa el calentamiento del dieléctrico. El calor es una forma de energía que se debe tener en cuenta cuando se propaga energía por la línea. Para las líneas con dieléctrico de aire, la pérdida por calentamiento es despreciable. Sin embargo, con las líneas rígidas el calentamiento del dieléctrico aumenta con la frecuencia.

Pérdida por radiación Si la separación entre los conductores de una línea de transmisión es una fracción apreciable de una longitud de onda, los campos electrostático y electromagnético que rodean al conductor hacen que la línea funcione como si fuera una antena, y transfiera energía a cualquier material conductor cercano. La cantidad de energía irradiada depende del material dieléctrico, la distancia entre conductores y la longitud de la línea. Las pérdidas por radiación se reducen blindando el cable en forma adecuada. Así, los cables coaxiales tienen menores pérdidas por radiación que las líneas de dos alambres paralelos. La pérdida por radiación también es proporcional a la frecuencia.

Pérdida por acoplamiento La pérdida por acoplamiento se presenta siempre que se hace una conexión con o de una línea de transmisión, o cuando se conectan dos tramos separados de línea de transmisión. Las conexiones mecánicas son discontinuidades, es decir, lugares donde se unen materiales distintos. Las discontinuidades se tienden a calentar, irradian energía y disipan potencia.

Efecto corona (o efecto de arco voltaico) El arco voltaico es una descarga luminosa que se produce entre dos conductores de una línea del dieléctrico aislante. En general, una vez que se produce el efecto de arco voltaico o efecto corona, la línea de transmisión se destruye.

3.1.10. Resistividad

La resistividad es la resistencia eléctrica específica de un determinado material. Se designa por la letra griega rho minúscula (ρ) y se mide en ohmios \cdot metro ($\Omega \cdot m$).

Su valor describe el comportamiento de un material frente al paso de corriente eléctrica: un valor alto de resistividad indica que el material es un aislante mientras que un valor bajo indica que es un conductor.

Elementos o materiales	Conductividad	resistividad
Plata	0,6305	0,0164
cobre	0,5958	0,0172
oro	0,4464	0,0230
aluminio	0,3767	0,0278
Latón	0,1789	0,0590
Cinc	0,1690	0,0610
Cobalto	0,1693	0,0602
Niquel	0,1462	0,0870
hierro	0,1030	0,0970
Acero	0,1000	0,1000
platino	0,0943	0,1050
Estaño	0,0839	0,1200
plomo	0,0484	0,2815
Magnesio	0,0054	2.700
Cuarzo	0,0016	4.500
Grafito	0,0012	8.000
madera seca	.0,0010	10.000
carbón	0,00025	40.000

Figura 11: Tabla de resistividad de algunos elementos

4. Dispositivos

La transmisión de energía eléctrica a través de líneas de transmisión implica inevitablemente la disipación de una parte de esa energía en forma de calor, radiación y otras pérdidas. Estas pérdidas energéticas, que pueden reducir la eficiencia del sistema y generar problemas operativos, son causadas por diversos factores relacionados con las características de la línea, los materiales utilizados y las condiciones ambientales. Para cuantificar y analizar estas pérdidas de manera precisa, es fundamental emplear dispositivos de medición especializados. En esta sección, exploraremos en detalle los distintos instrumentos utilizados para medir las pérdidas en líneas de transmisión en los diferentes tipos de pérdidas antes mencionados, lo que permitirá una evaluación exhaustiva del desempeño de los sistemas de transmisión y la identificación de áreas de mejora.

4.1. Medición de pérdidas en el conductor (Efecto Joule)

Las pérdidas en los conductores de una línea de transmisión, que son principalmente pérdidas resistivas (efecto Joule), pueden medirse utilizando diversos métodos, tanto directos como indirectos, dependiendo del equipo disponible, el tipo de línea, y la precisión deseada. A continuación te explico algunas de las formas más comunes para medir estas pérdidas:

4.1.1. Medición de la caída de voltaje

Uno de los métodos más sencillos para medir las pérdidas resistivas en un conductor es medir la caída de voltaje entre dos puntos de la línea de transmisión, generalmente entre la fuente y la carga.

La pérdida resistiva puede calcularse como:

$$P_{perdida} = I \cdot \Delta V \quad (13)$$

Donde:

I = es la corriente que fluye por el conductor.

ΔV = es la caída de voltaje entre los dos puntos del conductor (medida con un voltímetro).

- **Ventajas**

Método directo y sencillo.

- **Desventajas**

Es más útil para distancias cortas y situaciones donde el voltaje no es muy elevado.

4.1.2. Medición de la resistencia del conductor y cálculo de pérdidas

Otra forma común de cuantificar las pérdidas resistivas en un conductor es medir la resistencia del conductor y luego calcular las pérdidas a partir de la corriente que fluye por el conductor.

Las pérdidas resistivas se calculan como:

$$P_{resistivas} = I^2 R \quad (14)$$

Donde:

I = es la corriente que circula por el conductor. R = es la resistencia del conductor.

Proceso:

1. Mide la resistencia del conductor mediante un ohmímetro o calculando su resistencia a partir de las propiedades conocidas del material.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (15)$$

2. Mide la corriente que circula por el conductor.
3. Aplicar la fórmula 14 para calcular las pérdidas.

- **Ventaja**

Método preciso para pérdidas resistivas.

- **Desventaja**

Requiere conocer o medir la resistencia exacta del conductor, lo que puede ser complicado si las condiciones de temperatura varían, ya que la resistividad de los materiales cambia con la temperatura.

4.1.3. Medición directa de la potencia de entra y salida

Este método consiste en medir la potencia de entrada en un extremo de la línea de transmisión y la potencia de salida en el otro extremo. La diferencia entre ambas potencias representa las pérdidas totales en la línea, incluidas las pérdidas resistivas en el conductor.

$$P_{perdida} = P_{entrada} - P_{salida} \quad (16)$$

- **Ventajas**

Este método permite obtener una visión global de las pérdidas en la línea.

- **Desventajas**

Las mediciones incluyen todas las pérdidas, por lo que no es fácil separar las pérdidas resistivas de otras.

4.1.4. Medición de la temperatura del conductor

Las pérdidas resistivas en los conductores provocan un aumento de la temperatura debido al efecto Joule. Midiendo el incremento de temperatura en el conductor, se puede estimar la potencia disipada.

Proceso

1. Utiliza un termómetro infrarrojo o sensores de temperatura para medir la temperatura del conductor en condiciones de operación.
2. Compara la temperatura medida con la temperatura ambiente o la temperatura del conductor cuando no circula corriente.
3. Utiliza las propiedades térmicas del conductor para calcular la energía disipada como calor, lo que te da una idea de las pérdidas resistivas.

■ Ventaja

Es una forma indirecta de medir las pérdidas que no requiere desconectar la línea.

■ Desventaja

Depende de una buena calibración y comprensión del entorno de operación (pérdidas adicionales debidas a la radiación térmica, convección, etc.).

4.1.5. Medición mediante técnicas de reflectometría (TDR)

La reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) es una técnica utilizada para detectar fallos o cambios en la impedancia de una línea de transmisión, lo cual puede ayudar a identificar zonas con alta resistencia o pérdidas significativas.

Proceso

1. Se envía un pulso de corriente o voltaje a lo largo del conductor.
2. Se mide el tiempo que tarda el pulso en reflejarse desde los extremos o puntos de discontinuidad en la línea.
3. Las reflexiones indican cambios en la impedancia que pueden estar asociados a pérdidas resistivas o defectos en la línea.

■ Ventaja

Detecta pérdidas no uniformes a lo largo del conductor, como puntos calientes o conexiones defectuosas.

■ Desventaja

Requiere equipo especializado y es más útil para diagnósticos y mantenimiento que para una medición continua de pérdidas resistivas.

4.1.6. Medición de pérdidas mediante análisis armónico

Las pérdidas resistivas pueden aumentar en presencia de armónicos, especialmente en sistemas de transmisión de corriente alterna (CA). Midiendo los armónicos presentes en la línea, se puede estimar cómo los armónicos contribuyen a las pérdidas adicionales en los conductores.

Proceso

1. Se usa un analizador de armónicos para medir la distorsión de la forma de onda de la corriente en el conductor.
2. Se analiza el contenido armónico y su impacto en las pérdidas resistivas.

■ Ventaja

Este método es útil para sistemas donde las pérdidas pueden verse incrementadas por el uso de cargas no lineales.

■ Desventaja

Es un método indirecto y requiere analizar la contribución específica de los armónicos a las pérdidas.

4.1.7. Medición con sensores en tiempo real (sensores de corriente y tensión)

En sistemas modernos, se pueden utilizar sensores inteligentes para medir corriente y voltaje en diferentes secciones de la línea de transmisión en tiempo real. Los sensores envían los datos a un sistema central que calcula las pérdidas de manera continua.

Proceso

1. Instalar sensores de corriente y voltaje a lo largo de la línea de transmisión.
2. Medir en tiempo real las condiciones operativas y calcular la potencia disipada en cada sección de la línea.
3. Los sistemas inteligentes pueden detectar aumentos repentinos en las pérdidas y generar alertas.

■ Ventaja

Monitoreo en tiempo real de las pérdidas sin interrumpir el servicio.

■ Desventaja

Costo elevado y requerimiento de infraestructura adicional.

4.1.8. Estrategias de mitigación

- **Usar conductores de mayor diámetro:** Al aumentar el área transversal del conductor, se reduce su resistencia. Esto disminuye las pérdidas resistivas, ya que $R = \frac{\rho L}{A}$, donde R es la resistencia, ρ es la resistividad del material, L la longitud y A el área de la sección transversal.
- **Utilizar materiales conductores con menor resistividad:** El uso de conductores de materiales con menor resistividad, como el aluminio o el cobre, reduce las pérdidas. El cobre, por ejemplo, tiene una resistividad más baja que el aluminio, lo que lo hace más eficiente en términos de pérdidas resistivas.
- **Aumentar la conductancia:** Utilizar aleaciones o técnicas de fabricación avanzadas para mejorar la conductancia de los materiales, minimizando así las pérdidas.
- **Reducir la longitud de las líneas:** Si es factible, la reducción de la longitud de las líneas de transmisión disminuye la resistencia global y, por ende, las pérdidas resistivas.

4.2. Medición de pérdidas por calentamiento del dieléctrico

Las líneas de transmisión son elementos fundamentales en los sistemas eléctricos de potencia, encargados de transportar energía eléctrica a grandes distancias. Sin embargo, durante este proceso, una parte de la energía se pierde en forma de calor debido a diversos factores, entre ellos, el calentamiento dieléctrico. Este fenómeno ocurre cuando el material aislante de la línea se somete a un campo eléctrico intenso, lo que puede generar pérdidas de energía y, en casos extremos, fallas en el sistema.

Para garantizar la eficiencia y la seguridad de las líneas de transmisión, es crucial contar con dispositivos capaces de medir y monitorear las pérdidas por calentamiento dieléctrico. Estos dispositivos permiten detectar de manera temprana cualquier anomalía en el aislamiento, evitando así fallas catastróficas y minimizando los tiempos de inactividad del sistema.

4.2.1. Probadores de Pérdida Dieléctrica

Los medidores de pérdidas dieléctricas son ampliamente utilizados en laboratorios y en campo para evaluar la condición de materiales aislantes en cables, transformadores, condensadores y otros componentes eléctricos. Al identificar y cuantificar las pérdidas dieléctricas, estos

instrumentos permiten detectar de manera temprana el deterioro del aislamiento, prevenir fallas catastróficas y garantizar la fiabilidad de los sistemas eléctricos. Además, los datos obtenidos a partir de estas mediciones son fundamentales para optimizar el diseño de nuevos materiales aislantes y mejorar la eficiencia energética de los equipos eléctricos

Funcionamiento de los probadores de Pérdida Dieléctrica

1. **Aplicación de Corriente Alterna:** El generador de corriente alterna aplica una señal de prueba al material dieléctrico.
2. **Medición de Parámetros Eléctricos:** El medidor de voltaje y corriente registra los valores de voltaje y corriente aplicados al material.
3. **Cálculo de Pérdida Dieléctrica:** La calculadora de pérdida analiza los datos registrados para determinar la cantidad de energía disipada en forma de calor.
4. **Visualización de Resultados:** Los resultados se muestran en la pantalla del dispositivo, proporcionando una medida cuantitativa de la pérdida dieléctrica.

Componentes de los probadores de Pérdida Dieléctrica

- Generador de Corriente Alterna
- Medidor de Voltaje y Corriente
- Calculadora de Pérdida

4.2.2. Cámaras Termográficas

Mediante el uso de cámaras termográficas, se capturan imágenes térmicas que revelan las variaciones de temperatura en la superficie de los equipos eléctricos. Posteriormente, mediante el empleo de software especializado, se analizan estas imágenes para identificar con precisión las áreas con anomalías térmicas, cuantificar la magnitud de dichas anomalías y determinar su potencial impacto en la operación del sistema.

Funcionamiento de las Cámaras Termográficas

1. **Captura de Radiación Infrarroja:** La lente de la cámara termográfica captura la radiación infrarroja emitida por la línea de transmisión y la enfoca en el sensor.

2. **Conversión a Señal Eléctrica:** El sensor de imagen infrarroja convierte la radiación capturada en una señal eléctrica proporcional a la temperatura de la superficie.
3. **Procesamiento de Señal:** La electrónica de procesamiento convierte la señal eléctrica en una imagen térmica, que se muestra en la pantalla de la cámara.
4. **Análisis de Imágenes Térmicas:** El software de análisis permite identificar puntos calientes en la línea de transmisión, que pueden indicar pérdidas de energía o problemas de aislamiento.

Componentes de las Cámaras Termográficas

- Lente
- Sensor de Imagen Infrarroja (Detector)
- Electrónica de Procesamiento
- Software de Análisis

4.2.3. Medidores de Factor de Potencia

Los medidores de factor de potencia son instrumentos diseñados para evaluar la eficiencia con la que se utiliza la energía eléctrica en un sistema. Un factor de potencia bajo indica una elevada cantidad de potencia reactiva, lo cual puede generar pérdidas energéticas significativas en la transmisión y distribución. Mediante la medición y ajuste del factor de potencia, es posible optimizar la eficiencia del sistema eléctrico y minimizar las pérdidas. Estos dispositivos resultan fundamentales para identificar de manera temprana problemas que puedan comprometer la fiabilidad del sistema, permitiendo realizar acciones correctivas antes de que se produzcan fallas mayores.

Funcionamiento de los medidores de Factor de Potencia

1. **Medición de Corriente y Voltaje:** Los transformadores de corriente y voltaje miden las señales de corriente y voltaje en la línea de transmisión.
2. **Cálculo del Factor de Potencia:** El circuito de medición utiliza las señales de corriente y voltaje para calcular el factor de potencia, que es la relación entre la potencia activa (real) y la potencia aparente.

3. **Visualización de Resultados:** Los resultados se muestran en la pantalla del medidor, permitiendo al usuario evaluar la eficiencia del sistema.

Componentes de los medidores de Factor de Potencia

- Transformador de Corriente (CT)
- Transformador de Voltaje (VT)
- Circuito de Medición
- Pantalla
- Unidad de Procesamiento

4.2.4. Medidores de Impedancia

Los medidores de impedancia son instrumentos diseñados para determinar la impedancia característica de las líneas de transmisión. Esta medición es fundamental para identificar desajustes que pueden provocar pérdidas de energía por calentamiento del dieléctrico y reflexiones de señal. Al garantizar que la impedancia se encuentre dentro de los parámetros establecidos, se optimiza la eficiencia de la transmisión eléctrica y se minimizan las pérdidas. Estos dispositivos son esenciales en las etapas de instalación y mantenimiento de líneas de transmisión, asegurando un funcionamiento óptimo del sistema.

Funcionamiento de los Medidores de Impedancia

1. **Aplicación de Señal de Prueba:** La fuente de señal genera una corriente alterna que se aplica al circuito bajo prueba.
2. **Medición de Corriente y Voltaje:** Los transformadores de corriente y voltaje miden las señales de corriente y voltaje en el circuito.
3. **Cálculo de Impedancia:** El circuito de medición utiliza las señales de corriente y voltaje para calcular la impedancia, que es la combinación de resistencia (R) y reactancia (X) en el circuito.
4. **Visualización de Resultados:** Los resultados se muestran en la pantalla del medidor, permitiendo al usuario evaluar la impedancia del circuito.

Componentes de los Medidores de Impedancia

- Fuente de Señal
- Transformador de Corriente (CT)
- Transformador de Voltaje (VT)
- Circuito de Medición
- Pantalla
- Unidad de Procesamiento

4.2.5. Estrategias de mitigación

- **Utilizar dieléctricos de baja pérdida:** Seleccionar materiales aislantes con una tangente de pérdidas ($\tan \delta$) baja. Materiales como polietileno reticulado (XLPE) o polipropileno tienen mejores propiedades dieléctricas y menor factor de pérdida que otros materiales más antiguos.
- **Mejorar la calidad del aislamiento:** Un aislamiento más grueso y de mejor calidad reduce las pérdidas dieléctricas. Esto implica el uso de mejores recubrimientos y técnicas de aislamiento en los cables.
- **Control de la humedad:** El agua en el dieléctrico aumenta las pérdidas. El uso de barreras impermeables y sellos puede evitar la absorción de humedad, lo que contribuye a mitigar las pérdidas.

4.3. Medición de pérdidas por radiación

Si la separación entre los conductores de una línea de transmisión es una fracción apreciable de una longitud de onda, los campos electrostático y electromagnético que rodean a los conductores hacen que la línea actúe como una antena, irradiando energía hacia el medio circundante. La cantidad de energía radiada depende de diversos factores, tales como el material dieléctrico, la distancia entre conductores y la longitud de la línea. Para reducir las pérdidas por radiación, es común emplear blindajes metálicos, como en el caso de los cables coaxiales, los cuales presentan menores pérdidas en comparación con las líneas de dos hilos paralelos.

Además, es importante destacar que las pérdidas por radiación son directamente proporcionales a la frecuencia de la señal transmitida. Para cuantificar estas pérdidas, se emplean dispositivos y técnicas de medición específicas, diseñadas para evaluar el rendimiento de las líneas de transmisión en diferentes condiciones operativas.

4.3.1. Analizadores de Red Vectorial (VNA):

Estos dispositivos son esenciales para medir parámetros S (scattering parameters), que ayudan a determinar las pérdidas de inserción y retorno en las líneas de transmisión. Los VNAs son muy precisos y se utilizan ampliamente en la caracterización de componentes de RF y microondas.

Funcionamiento de los VNAs:

1. **Generación de Señal:** El VNA genera una señal de RF o microondas que se envía a través de la línea de transmisión o el dispositivo bajo prueba (Device Under Test (DUT)).
2. **Medición de Parámetros S:** Los VNAs miden los parámetros de dispersión (parámetros S), que describen cómo las señales se reflejan y transmiten a través del DUT. Los parámetros S más comunes son:
 - S_{11} : Coeficiente de reflexión de entrada, que indica la cantidad de señal reflejada de vuelta hacia la fuente.
 - S_{21} : Coeficiente de transmisión, que indica la cantidad de señal que pasa a través del DUT.
3. **Análisis de Reflexión y Transmisión:** Al medir S_{11} y S_{21} , el VNA puede determinar las pérdidas de inserción (pérdida de señal al pasar a través del DUT) y las pérdidas de retorno (pérdida de señal reflejada de vuelta hacia la fuente).
4. **Calibración:** Para obtener mediciones precisas, los VNAs deben ser calibrados. Esto implica usar estándares conocidos para corregir cualquier error sistemático en las mediciones.
5. **Visualización y Análisis:** Los resultados se visualizan en una pantalla, mostrando gráficos como el diagrama de Smith, que ayuda a interpretar las características de impedancia y las pérdidas en la línea de transmisión.

Componentes de los VNAs:

- Generador de Señales
- Detectores de Señales
- Sistema de Conmutación
- Sistema de Control y Procesamiento de Datos

4.3.2. Medidores de ROE (Relación de Onda Estacionaria)

Los medidores de ROE (Relación de Onda Estacionaria), o SWR (Standing Wave Ratio) en inglés, son instrumentos fundamentales en la evaluación de la eficiencia de sistemas de radiofrecuencia (RF). Estos dispositivos permiten cuantificar la adaptación de impedancias entre un transmisor y una línea de transmisión. Una ROE elevada indica una mala adaptación, lo que conlleva a una significativa reflexión de energía hacia el transmisor. Esta condición no solo disminuye la potencia efectiva radiada, sino que también puede sobrecargar componentes del equipo, acortando su vida útil. Mediante la medición y ajuste de la ROE, es posible optimizar el rendimiento de los sistemas RF, minimizando pérdidas y maximizando la eficiencia de la transmisión.

Funcionamiento de los medidores de ROE:

1. **Medición de Ondas Incidentales y Reflejadas:** El medidor de ROE mide la amplitud de las ondas incidentales (que viajan hacia la carga) y las ondas reflejadas (que regresan hacia la fuente) utilizando el acoplador direccional y los diodos detectores.
2. **Cálculo de la ROE:** La relación de onda estacionaria se calcula como la relación entre la amplitud de la onda incidente y la onda reflejada. Una ROE de 1:1 indica una adaptación perfecta, mientras que valores más altos indican una mayor cantidad de energía reflejada.
3. **Visualización de Resultados:** Los resultados se muestran en el indicador de ROE, permitiendo al usuario ajustar la antena o la línea de transmisión para minimizar las pérdidas.

Componentes de medidores de ROE:

- Acoplador Direccional

- Diodos Detectores
- Indicador de ROE
- Fuente de Alimentación

4.3.3. Analizadores de Espectro

Los analizadores de espectro permiten visualizar y cuantificar el contenido espectral de señales de radiofrecuencia (RF) y microondas. Resultan indispensables en la caracterización de líneas de transmisión, ya que facilitan la identificación y cuantificación de pérdidas por radiación. Al analizar el espectro de las señales irradiadas desde la línea, se pueden detectar fugas no deseadas, evaluar la eficiencia de los sistemas de blindaje y localizar puntos de alta atenuación. La información obtenida a través de estos instrumentos es fundamental para optimizar el diseño y el rendimiento de las líneas de transmisión, minimizando pérdidas y asegurando la integridad de la señal.

Funcionamiento de los Analizadores de Espectro:

1. **Generación de Señal:** El analizador recibe una señal de radiofrecuencia (RF) o microondas desde la línea de transmisión que se desea analizar.
2. **Conversión a Frecuencia Intermedia (FI):** La señal de entrada se mezcla con una señal de un oscilador local (LO) en un mezclador. Este proceso produce una nueva señal, la frecuencia intermedia (FI), que es la diferencia entre la frecuencia de la señal de entrada y la del LO. La FI se selecciona para facilitar el filtrado y la amplificación.
3. **Filtrado y Amplificación:** La señal de FI pasa a través de un filtro que selecciona la banda de frecuencia de interés y atenúa las componentes fuera de banda. A continuación, se amplifica para mejorar la relación señal-ruido.
4. **Detección:** La señal amplificada se detecta para obtener una señal de voltaje proporcional a la amplitud de la componente de frecuencia correspondiente.
5. **Visualización:** La señal detectada se muestra en una pantalla, típicamente como un gráfico de amplitud versus frecuencia, lo que permite al usuario visualizar el espectro de la señal de entrada.

6. **Análisis del Espectro:** El usuario puede analizar el espectro para determinar la frecuencia de las componentes, su amplitud relativa y la presencia de ruido o interferencias.

Componentes de los Analizadores de Espectro:

- Atenuador de Entrada
- Filtro de Paso Bajo
- Oscilador Local (OL)
- Mezclador
- Amplificador de FI
- Detector

4.3.4. Cámaras Anecoicas

Las cámaras anecoicas son recintos especialmente diseñados para absorber prácticamente la totalidad de las ondas electromagnéticas incidentes, minimizando así las reflexiones y creando un entorno electromagnéticamente aislado. Este tipo de cámaras se utilizan de manera extensiva en pruebas de compatibilidad electromagnética (EMC) y caracterización de antenas, ya que permiten realizar mediciones precisas de la radiación emitida por dispositivos electrónicos, como líneas de transmisión. Al eliminar las interferencias externas y las reflexiones, se obtienen datos más confiables sobre las pérdidas por radiación, lo que a su vez facilita la optimización del diseño de los equipos y sistemas de radiofrecuencia.

Funcionamiento de las Cámaras Anecoicas:

1. **Absorción de Ondas Electromagnéticas:** Las paredes, el techo y el suelo de la cámara anecoica están recubiertos con materiales absorbentes que minimizan las reflexiones de las ondas electromagnéticas. Esto permite simular un espacio libre y realizar mediciones precisas de las características de radiación de antenas y dispositivos electrónicos.
2. **Medición Precisa:** Dentro de la cámara, se colocan antenas de medición que emiten y reciben señales de radiofrecuencia. Estas mediciones permiten evaluar con precisión las pérdidas por radiación en líneas de transmisión, componentes electrónicos y sistemas completos.

3. **Análisis de Resultados:** Los datos obtenidos de las mediciones se analizan utilizando software especializado para identificar puntos de alta radiación, evaluar la efectividad del blindaje electromagnético y determinar la compatibilidad electromagnética (EMC) de los dispositivos bajo prueba.

Componentes de las Cámaras Anecoicas:

- Jaula de Faraday
- Materiales Absorbentes
- Antenas de Medición

4.3.5. Sondas de Campo Electromagnético

Las sondas electromagnéticas son instrumentos de medición utilizados para cuantificar la intensidad de los campos eléctricos y magnéticos en las proximidades de las líneas de transmisión. Estas sondas resultan indispensables para identificar y localizar puntos de alta radiación, lo que puede indicar la presencia de pérdidas significativas en la línea o un diseño inadecuado del blindaje. Además, permiten evaluar la eficacia de las medidas de protección implementadas para reducir las emisiones electromagnéticas no deseadas. La información recopilada mediante estas sondas es fundamental para optimizar el diseño de las líneas de transmisión, garantizar la compatibilidad electromagnética y minimizar los riesgos asociados a la exposición a campos electromagnéticos.

Funcionamiento de las sondas de campo electromagnético:

1. **Detección de Campos Electromagnéticos:** La sonda cuenta con una antena especialmente diseñada para captar los campos eléctricos y magnéticos generados por la fuente de radiación, como una línea de transmisión.
2. **Conversión de Señal:** La señal electromagnética capturada por la antena se convierte en una señal eléctrica, generalmente una corriente o un voltaje, que puede ser procesada electrónicamente.
3. **Amplificación y Procesamiento:** La señal eléctrica resultante es amplificada para mejorar su relación señal-ruido y luego procesada por circuitos electrónicos. Este procesamiento

puede incluir filtrado, detección y conversión analógica-digital.

4. **Visualización de Resultados:** Los resultados del procesamiento de la señal se muestran en una pantalla, ya sea en forma de valores numéricos (intensidad del campo en V/m o A/m) o en forma gráfica. Esta visualización permite al usuario identificar las áreas con mayor intensidad de campo y evaluar la efectividad de las medidas de protección contra las radiaciones electromagnéticas.

Componentes de las sondas de campo electromagnético:

- Antena de Captura
- Detector
- Amplificador
- Unidad de Procesamiento

4.3.6. Estrategias de mitigación

- **Diseño adecuado de las líneas de transmisión:** Las líneas de transmisión deben diseñarse para minimizar el desajuste de impedancia, ya que esto puede aumentar las pérdidas por radiación. Se deben evitar cambios bruscos en la geometría de los conductores y realizar una correcta adaptación de impedancias.
- **Minimizar la longitud de los tramos sin apantallamiento:** Para líneas de transmisión en frecuencias más altas (como las de microondas), la instalación de blindaje o apantallamiento alrededor de los conductores puede reducir las pérdidas por radiación.
- **Uso de cables coaxiales o guías de onda:** En sistemas de transmisión de alta frecuencia, el uso de cables coaxiales, guías de onda o cables apantallados es una forma efectiva de contener la radiación electromagnética y reducir estas pérdidas.

4.4. Medición de pérdidas por acoplamiento

Las líneas de transmisión, encargadas de transportar energía eléctrica a grandes distancias, son susceptibles a interferencias electromagnéticas que pueden causar pérdidas de energía

y degradar la calidad de la señal. Estas interferencias, conocidas como acoplamiento, se producen cuando campos electromagnéticos externos inducen corrientes parásitas en los conductores de la línea.

Para garantizar la eficiencia y la confiabilidad de los sistemas de transmisión, es fundamental contar con dispositivos capaces de medir y monitorear las pérdidas por acoplamiento. Estos dispositivos permiten identificar las fuentes de interferencia, evaluar su impacto en la línea y tomar medidas correctivas para minimizar sus efectos.

4.4.1. Reflectómetro en el Dominio del Tiempo (TDR)

El reflectómetro en el dominio del tiempo (TDR) es un instrumento indispensable para caracterizar líneas de transmisión. Al analizar las reflexiones de pulsos electromagnéticos, el TDR permite identificar y localizar no solo pérdidas por acoplamiento, sino también discontinuidades como cortocircuitos, circuitos abiertos y cambios de impedancia, proporcionando información crucial para la evaluación de la integridad del sistema.

Funcionamiento del TDR

1. **Generación de Pulso:** El TDR envía un pulso de señal de alta frecuencia a lo largo de la línea de transmisión.
2. **Reflexión de la Señal:** Si la línea tiene una impedancia uniforme y está correctamente terminada, el pulso se absorbe al final de la línea. Sin embargo, cualquier discontinuidad en la impedancia (como empalmes, conectores o defectos) reflejará parte del pulso de vuelta hacia el TDR.
3. **Análisis de la Reflexión:** El TDR mide el tiempo que tarda la señal reflejada en regresar. Dado que la velocidad de propagación de la señal es constante para una impedancia dada, el tiempo de retorno se puede convertir en una distancia, localizando así la discontinuidad.

Componentes del TDR

- Generador de Pulso
- Transmisor/Receptor
- Osciloscopio o Display

- Procesador de Señal

4.4.2. Puentes de medición

Los puentes de medición son dispositivos utilizados para medir parámetros eléctricos como resistencia, capacitancia e inductancia. Son especialmente útiles para detectar pérdidas por acoplamiento en líneas de transmisión. En el contexto de las líneas de transmisión, los puentes de medición pueden detectar pérdidas por acoplamiento al medir la impedancia en diferentes puntos de la línea. Al equilibrar el puente, se pueden identificar discontinuidades y variaciones en la impedancia que indican pérdidas de energía.

Funcionamiento de los Puentes de medición

Los puentes de medición funcionan comparando una cantidad desconocida con una cantidad conocida. El principio básico es equilibrar el puente, de modo que la corriente a través del detector (generalmente un galvanómetro) sea cero. Este equilibrio indica que las proporciones de las resistencias (o impedancias) en los brazos del puente son iguales, permitiendo calcular el valor desconocido.

Componentes de los Puentes de medición

- Resistencias Conocidas
- Resistencia Desconocida
- Galvanómetro
- Fuente de Alimentación
- Ajustes Finos

4.4.3. Osciloscopios de Alta Frecuencia

Los osciloscopios de alta frecuencia son instrumentos indispensables para el análisis detallado de señales eléctricas en líneas de transmisión. Al permitir visualizar y cuantificar las formas de onda, estos dispositivos facilitan la detección y caracterización de pérdidas por acoplamiento, distorsiones y otras no linealidades que pueden afectar la calidad de la señal.

Esta información es crucial para optimizar el rendimiento de los sistemas de comunicación y garantizar la integridad de los datos transmitidos.

Funcionamiento de los Osciloscopios de Alta Frecuencia

1. **Captura de Señal:** Los osciloscopios de alta frecuencia capturan señales eléctricas a través de sondas conectadas a la línea de transmisión. Estas sondas pueden ser pasivas o activas, dependiendo de la frecuencia y la precisión requeridas.
2. **Amplificación de Señal:** La señal capturada se amplifica para que pueda ser procesada y visualizada. Esto es crucial para señales de alta frecuencia que pueden ser muy débiles.
3. **Digitalización:** La señal amplificada se convierte de analógica a digital mediante un convertidor analógico-digital (ADC). Esto permite un análisis más preciso y detallado.
4. **Visualización:** La señal digitalizada se muestra en una pantalla, permitiendo observar la forma de onda en función del tiempo. Esto ayuda a identificar anomalías y pérdidas por acoplamiento en la línea de transmisión.

Componentes de los Osciloscopios de Alta Frecuencia

- Sondas
- Amplificador Vertical
- Convertidor Analógico-Digital (ADC)
- Pantalla
- Unidad de Procesamiento
- Controles de Tiempo y Voltaje

4.4.4. Estrategias de mitigación

- **Aumentar la separación entre líneas:** Incrementar la distancia entre las líneas de transmisión reduce el acoplamiento capacitivo e inductivo. Esto es particularmente importante en redes donde varias líneas están ubicadas cerca una de la otra.

- **Uso de apantallamiento entre conductores:** Colocar materiales conductores entre las líneas que puedan actuar como barreras físicas reduce la posibilidad de acoplamiento electromagnético. El blindaje metálico es efectivo para evitar el acoplamiento de señales entre conductores adyacentes.
- **Optimización del diseño de la red:** El uso de configuraciones simétricas de las líneas y la torsión de los conductores ayuda a minimizar las pérdidas por acoplamiento. Además, la planificación cuidadosa de la red para evitar la proximidad entre líneas de alta potencia y líneas de señales sensibles reduce las pérdidas.

4.5. Medición de pérdidas por efecto corona

Las líneas de transmisión de alta tensión son esenciales para el transporte de energía eléctrica a grandes distancias. Sin embargo, durante este proceso, pueden producirse pérdidas energéticas debido a diversos fenómenos físicos, uno de los cuales es el efecto corona. Este fenómeno se manifiesta como una descarga eléctrica parcial que ocurre en las proximidades de los conductores cuando el campo eléctrico excede un cierto valor crítico.

El efecto corona tiene diversas consecuencias negativas, como la generación de ruido audible, interferencias radioeléctricas, producción de ozono y, lo más importante, pérdidas de energía. Para mitigar estos efectos y garantizar la eficiencia de las líneas de transmisión, es fundamental contar con dispositivos capaces de medir y monitorear el efecto corona.

4.5.1. Detectores de Fallos de Arco (AFDD)

Los detectores de fallas de arco (AFDD) son dispositivos de protección diseñados para detectar y desconectar circuitos afectados por arcos eléctricos. Su implementación en líneas de transmisión contribuye a la prevención de incendios, la protección de equipos y la mejora de la continuidad del servicio. Los AFDD permiten identificar proactivamente condiciones anómalas, facilitando las tareas de mantenimiento.

Funcionamiento de los detectores de fallas de arco (AFDD)

1. **Detección de Patrones de Onda:** Los AFDD monitorean continuamente las formas de onda de la corriente en la línea de transmisión. Detectan patrones de onda aleatorios y persistentes que indican la presencia de un arco eléctrico.

2. **Análisis de Señal:** Utilizan algoritmos avanzados para analizar las señales eléctricas y diferenciar entre arcos peligrosos y otras perturbaciones eléctricas normales.
3. **Desconexión del Circuito:** Cuando se detecta un patrón de onda que indica un arco peligroso, el AFDD se dispara y desconecta el circuito afectado para evitar daños mayores.

Componentes de los detectores de fallas de arco (AFDD)

- Sensor de Corriente
- Módulo de Análisis
- Interruptor de Corte
- Transformador de Secuencia Cero
- Indicadores de Estado

4.5.2. Medidores de Descarga Parcial

Los medidores de descarga parcial son herramientas indispensables tanto en la fabricación como en la operación de equipos eléctricos. En la fase de fabricación, estos instrumentos garantizan que los componentes cumplan con los estándares de calidad, identificando cualquier defecto en el aislamiento. En servicio, los medidores de descarga parcial permiten monitorear continuamente el estado del aislamiento de las líneas de transmisión, detectando y cuantificando las descargas parciales para evaluar el riesgo de falla y programar el mantenimiento de manera proactiva.

Funcionamiento de los Medidores de Descarga Parcial

1. **Detección de Pulsos de Descarga:** Los medidores de descarga parcial detectan pulsos eléctricos que ocurren cuando hay una ruptura dieléctrica parcial en el aislamiento de la línea de transmisión.
2. **Preamplificación y Digitalización:** La señal de entrada, que incluye el pulso de descarga parcial, se preamplifica y digitaliza mediante un convertidor analógico/digital.
3. **Procesamiento de Señal:** La señal digitalizada se procesa mediante filtros digitales y algoritmos de detección para identificar y cuantificar las descargas parciales.

4. **Análisis y Diagnóstico:** Los datos procesados se analizan para evaluar la integridad del aislamiento y determinar la ubicación y severidad de las descargas parciales.

Componentes de los Medidores de Descarga Parcial

- Sensores de Descarga Parcial (ultrasonido, HFCT, campo eléctrico)
- Preamplificador
- Convertidor Analógico/Digital (ADC)
- Unidad de Procesamiento
- Interfaz de Usuario

4.5.3. Sensores de Campo Eléctrico

Los sensores de campo eléctrico son instrumentos de diagnóstico esenciales en el mantenimiento de líneas de transmisión. Al medir continuamente el campo eléctrico a lo largo de la línea, estos dispositivos permiten detectar de forma temprana anomalías que pueden indicar la presencia de descargas parciales, corrosión o daños en los conductores. Esta detección temprana facilita la planificación de un mantenimiento basado en la condición del equipo, optimizando la disponibilidad y confiabilidad del sistema eléctrico.

Funcionamiento de los Sensores de Campo Eléctrico

1. **Generación de Campo Eléctrico:** Los sensores de campo eléctrico funcionan creando un campo eléctrico entre dos electrodos. Cuando hay una variación en el campo eléctrico debido a una discontinuidad o defecto en la línea de transmisión, el sensor detecta esta variación.
2. **Detección de Variaciones:** Los cambios en el campo eléctrico son convertidos en señales eléctricas que pueden ser analizadas. Estos cambios pueden ser causados por fallos de aislamiento, descargas parciales o pérdidas por acoplamiento.
3. **Procesamiento de Señal:** Las señales eléctricas generadas por las variaciones en el campo eléctrico son procesadas y analizadas para determinar la naturaleza y ubicación del problema.

Componentes de los Sensores de Campo Eléctrico

- Electrodo
- Convertidor de Señal
- Unidad de Procesamiento

4.5.4. Estrategias de mitigación

- **Reducción de la resistencia y aumento de la eficiencia:** Asegurarse de que los conductores sean de alta calidad y bajo mantenimiento, lo que incluye la inspección y el reemplazo oportuno de conductores degradados.
- **Monitoreo en tiempo real:** El uso de tecnologías como la termografía infrarroja, sensores y drones permite identificar áreas con alta generación de pérdidas, ya sea por sobrecalentamiento, desgaste o problemas de corona, permitiendo intervenciones preventivas.
- **Mantenimiento preventivo:** Realizar un mantenimiento regular para evitar el deterioro de los conductores, los aisladores y otros componentes de la línea. El mantenimiento adecuado prolonga la vida útil del sistema y evita pérdidas adicionales.

5. Propuesta de diseño

En este apartado el enfoque va dirigido a la simulación a realizar para poder observar, calcular y mitigar, en especial un tipo de pérdida en la línea de transmisión. Esta sera la pérdida resistiva del conductor como se estudia más adelante, de una manera detallada en las secciones 3 y 4.

La propuesta de diseño se desea plasmar a través de gráficas que demuestren que con diferentes materiales de un conductor se puede aminorar las perdidas de este, por ende, permite demostrar de una manera sencilla y simplificada, a través de los cálculos, lo que se puede detallar en la vida real simulando los datos que se tienen para la ejecución de un proyecto basado en el despliegue de una línea de transmisión.

5.1. Demostración

1. **Facilidad de simulación:** las pérdidas resistivas dependen directamente de la resistencia del conductor, la corriente y la longitud de la línea, lo cual es sencillo de modelar y simular.
2. **Disponibilidad de medidas:** se puede simular el comportamiento de una línea de transmisión aplicando las leyes básicas de Ohm y calcular las pérdidas de potencia en función de las propiedades del conductor.
3. **Mitigación clara:** La mitigación se puede realizar al aumentar el diámetro del conductor, cambiar el material o mejorar la calidad del conductor, lo que permite incluir fácilmente en la simulación y observar los resultados.

5.2. Proceso

1. Definir los parámetros de la línea de transmisión:
 - **Longitud de la línea:** L en metros.
 - **Resistencia del conductor (Medida indirecta):** se utiliza la fórmula 15, $R = \rho \frac{L}{A}$, donde:

ρ = es la resistividad del material (ejemplo, para el cobre, $\rho \approx 1,8 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$).

A = es el área de la sección transversal del conductor.

- **Corriente:** I en amperios.

2. **Cálculo de las pérdidas resistivas:** Se utiliza la fórmula de pérdidas resistivas 14:

$$P_{perdida} = I^2 R$$

- **Entrada:** Se define un valor de corriente y calcula la resistencia de la línea.
- **Salida:** Calcula las pérdidas resistivas.

3. **Implementación de mitigación:**

Como se observa en la formula 14, las pérdidas resistivas o la potencia que se pierde es directamente proporcional a la resistencia, debido a esto se puede asumir que al cambiar el diámetro del conductor y recalculas las pérdidas, ya sea aumentando el área de la sección transversal A , disminuirá la resistencia R y, por lo tanto, las pérdidas también.

De hecho, se puede aplicar otro escenario, que es al cambiar el material del conductor, siendo este la propiedad de la resistividad siendo proporcional a la resistencia, si se utiliza uno con menor resistividad (por ejemplo, cambiar de aluminio a cobre) y recalculas las pérdidas. Como consecuencia se obtendrá una reducción en su pérdida.

4. **Simulación gráfica:**

Se puede generar gráficos que muestren cómo varían las pérdidas en función de la corriente, el diámetro del conductor y/o la resistividad del material. Esto permitirá visualizar el efecto de la mitigación.

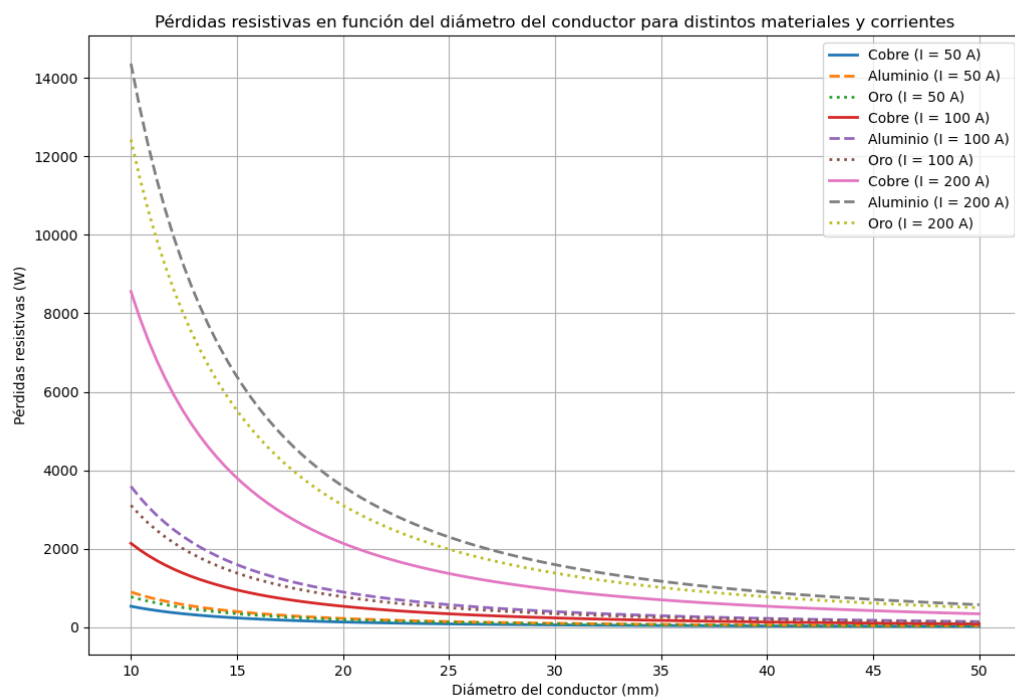
Es importante acotar, que las simulaciones se llevará a cabo a través del lenguaje de programación Python, siendo esta la herramienta facilitadora de los cálculos y la gráfica pertinente.

6. Simulaciones

A continuación, se hará uso del siguiente código para poder hacer los cálculos adecuados para el análisis de la simulación antes mencionada en la sección 5.

6.1. Código en Python para la simulación de pérdidas resistivas

De acuerdo con los cálculos obtenidos del código ??, los valores de cada parámetro y, la gráfica se mostraran a continuación, de esta manera poder analizar los resultados obtenidos de la simulación realizada.



Gráfica 1: Pérdidas resistivas en función del diámetro del conductor para distintos materiales y corrientes

Corriente (A)	Diámetro (mm)	Resistencia Cobre (Ohm)	Pérdidas Cobre (W)	Resistencia Aluminio (Ohm)	Pérdidas Aluminio (W)	Resistencia Oro (Ohm)	Pérdidas Oro (W)
50.0000	10.0000	0.2139	534.7606	0.3591	897.6339	0.3107	776.6761
50.0000	20.0000	0.0535	133.6902	0.0898	224.4085	0.0777	194.1690
50.0000	30.0000	0.0238	59.4178	0.0399	99.7371	0.0345	86.2973
50.0000	40.0000	0.0134	33.4225	0.0224	56.1021	0.0194	48.5423
50.0000	50.0000	0.0086	21.3904	0.0144	35.9054	0.0124	31.0670
100.0000	10.0000	0.2139	2,139.0424	0.3591	3,590.5355	0.3107	3,106.7045
100.0000	20.0000	0.0535	534.7606	0.0898	897.6339	0.0777	776.6761
100.0000	30.0000	0.0238	237.6714	0.0399	398.9484	0.0345	345.1894
100.0000	40.0000	0.0134	133.6902	0.0224	224.4085	0.0194	194.1690
100.0000	50.0000	0.0086	85.5617	0.0144	143.6214	0.0124	124.2682
200.0000	10.0000	0.2139	8,556.1697	0.3591	14,362.1421	0.3107	12,426.8180
200.0000	20.0000	0.0535	2,139.0424	0.0898	3,590.5355	0.0777	3,106.7045
200.0000	30.0000	0.0238	950.6855	0.0399	1,595.7936	0.0345	1,380.7576
200.0000	40.0000	0.0134	534.7606	0.0224	897.6339	0.0194	776.6761
200.0000	50.0000	0.0086	342.2468	0.0144	574.4857	0.0124	497.0727

Tabla 1: Tabla de datos de la simulación de Pérdidas resistivas en función del diámetro del conductor para distintos materiales y corrientes

Cómo se puede apreciar en la Gráfica 1 y la Tabla 1, existe unas diferencias notables, en especial en la Gráfica 1, evidenciando a simple vista que los diferentes tipos de materiales si son importantes para la mitigación de las pérdidas resistivas del conductor.

Por otro lado, los distintos cambios realizado a los parámetros como lo fue la corriente, y su diámetro, trae como consecuencia la acción de aumentar o disminuir las pérdidas; seguidamente sus valores de resistencia, calculado indirectamente debido a los cambios antes efectuado, por ende, se obtuvo una aproximación de ¿Cuál es el material que va a mitigar las perdidas resistivas?

Como se observa en la figura 8, los estándares en calibres van de 0.3606 (mm) a 11.86 (mm), es decir, se hará un énfasis a los valores de la tabla 1, que serán del 10 (mm) hasta los 30 (mm).

Con una corriente de 50 A, el cobre obtuvo una disminución con los distintos parámetros, observándose una disminución en sus resistencia y pérdidas, cuando su diámetro aumentaba, al igual que los demás elementos, sin embargo, de estos materiales quien le sigue la menor pérdida sería el oro, por ultimo el aluminio.

Así mismo, va ocurriendo al aumentar la corriente, demostrando que existe mayor pérdida al tener mas corriente debido al movimiento de carga en el conductor, produciendo en este caso el efecto Joule.

7. Conclusiones y posibles aplicaciones

En este trabajo se simuló y analizó un caso hipotético en el que se evaluaron las pérdidas resistivas en diferentes conductores, utilizando Python para modelar las propiedades resistivas de cada material. Los conductores analizados fueron cobre, aluminio y oro, considerando distintos valores de resistividad, diámetro y corriente. Esta simulación permitió obtener una visión simplificada de cómo la resistividad y el diámetro del conductor afectan las pérdidas de potencia en una línea de transmisión.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se concluyó que el mejor material para mitigar las pérdidas resistivas en los conductores es el cobre. Si bien el oro también podría ofrecer buenos resultados debido a su baja resistividad, su alto costo y uso limitado en aplicaciones específicas de electrónica lo hacen menos viable para aplicaciones de transmisión a gran escala. Al analizar los datos de la tabla 1, se observó que las pérdidas con el cobre fueron menores en un 31,15 % en comparación con el aluminio, lo que resulta en una menor resistencia total. Se evidenció que la resistencia es directamente proporcional a las pérdidas resistivas y que estas pueden reducirse aumentando el área transversal del conductor (en este caso, con un cable de longitud fija de 1000 m), ya que un mayor diámetro reduce las pérdidas resistivas.

Por otra parte, tanto el aluminio como el oro pueden descartarse como materiales preferidos para una línea de transmisión, lo que coincide con las prácticas industriales donde el cobre es el material de referencia para la mayoría de los cables conductores, aunque existen excepciones en situaciones específicas.

En cuanto a los métodos de medición de las pérdidas, la elección del procedimiento más adecuado dependerá de las herramientas disponibles, la complejidad del proyecto y la experiencia del personal a cargo. Sin embargo, es importante destacar que las pérdidas en una línea de transmisión pueden medirse de manera simplificada comparando la potencia de entrada con la potencia de salida. Cualquier diferencia entre ambas representaría la cantidad de energía disipada en forma de calor debido a las pérdidas resistivas.

Finalmente, en la sección 4 se presentaron distintos dispositivos y técnicas para mitigar las pérdidas en sistemas eléctricos, proporcionando alternativas para mejorar la eficiencia. Aunque inicialmente se consideró la posibilidad de simular los circuitos mediante herramientas como Multisim, Proteus o LTSpice, se optó por un enfoque más eficiente y directo, centrado en la simulación de las pérdidas resistivas en los conductores, lo que permitió demostrar con

claridad los efectos de la resistividad y el diámetro en la eficiencia del sistema.

Referencias

- [1] W. Tomasi, *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Pearson educación, 2003.
- [2] R. N. Vela, *Líneas de transmisión*. McGraw-Hill, 1999.