

---

# Capítulo

# 2

---

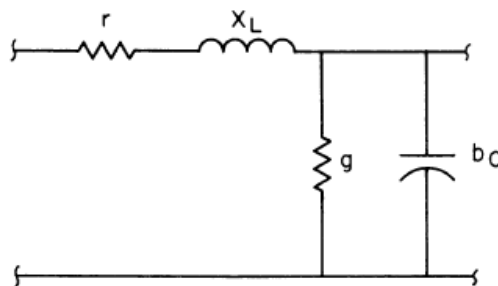
## Marco Teórico

### 2.1. INTRODUCCIÓN

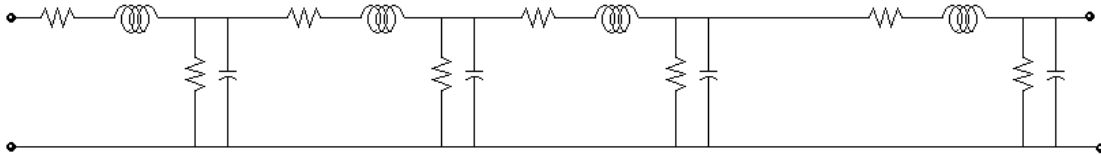
Los conductores conectados de una fuente a la carga presentan cuatro parámetros: resistencia, inductancia, capacitancia paralelo, y conductancia en paralelo estos afectan a las líneas aéreas y los mismos procedimientos de cálculo son usados obtener los valores de los parámetros en cada caso. Por esta razón, es común usar la palabra línea.

### 2.2. MODELOS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.

En las líneas de transmisión un conductor corto puede ser modelado como en la figura 2.1, una línea puede ser considerada como muchos conductores cortos colocados en serie, producen el modelo de la figura 2.2 la longitud individual de cada conductor podría ser hecha mas corta, de esta manera aumenta el numero de estos conductores para una dada longitud de línea. Continuando este proceso se define el modelo de línea de parámetros distribuidos este modelo ha sido reducido al circuito equivalente mostrado en la figura 2.2.



**Figura 2.1.** Circuito equivalente de conductor corto.



**Figura 2.2.** Línea con constantes distribuidas.

$$Z' = Z_C \frac{\sinh l}{l} \quad (2.1)$$

Y el ramal paralelo.

$$\frac{Y'}{2} = \frac{Y_C \tanh(l/2)}{2} \quad (2.2)$$

$$= \frac{1(\cosh l - 1)}{Z_C \sinh l} \quad (2.3)$$

Donde:

$Z_C = (z/y)$  Definido como la impedancia característica o súbita de la línea

$= (zy)$  Definido como la constante de propagación

La constante de propagación puede ser expresada en la forma rectangular:

$$= \alpha + j\beta \quad (2.4)$$

Donde:

$\alpha =$  La constante de atenuación

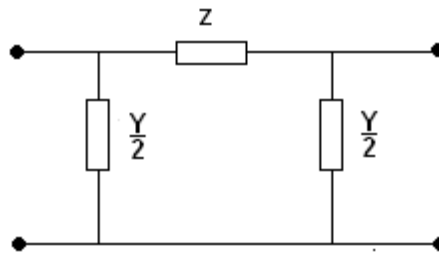
$\beta =$  Es la constante de fase

Los modelos de líneas han sido reducidos a los circuitos equivalentes mostrados a continuación

### 2.2.1. Líneas largas.

Frecuentemente en sistemas de potencia las líneas son de 150 millas deben ser representadas por las constantes distribuidas a un modelo reducido a un equivalente  $\pi$  como se muestra en la figura 2.3.

La conductancia shunt puede ser atenuada por que el dieléctrico es aire un buen dieléctrico y el espacio en el conductor es grande sin embargo si la capacitancia pierde esta importancia ellas deben ser representadas por  $g$ .



**Figura 2.3.** Circuito equivalente líneas largas ( $\pi$ ).

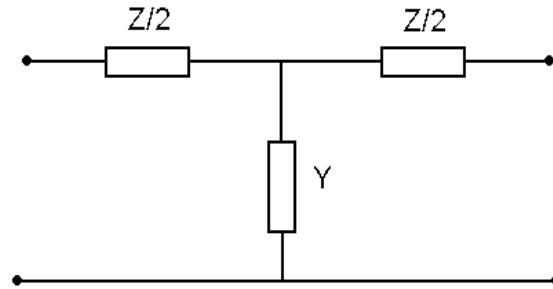
$$Z = (r + jx_L)l \quad (2.5)$$

$$Y = (g + jb_c)l \quad (2.6)$$

En este modelo el ramal paralelo es puramente capacitivo, el circuito nominal  $\pi$  puede ser diseñado al ser formado por el proceso descrito al inicio excepto que la unidad de longitud del conductor es aumentado, y el circuito es hecho simétrico. Este resulta en las constantes que son calculas por un proceso de aproximación, el circuito nominal T es formado de la misma forma excepto que todas las constantes shunt son aproximadas comparadas con el circuito  $\pi$ .

### 2.2.2. Líneas Medias.

Están en el rango de aproximadamente 50-150 millas (80-240km). Su circuito equivalente se muestra a continuación.



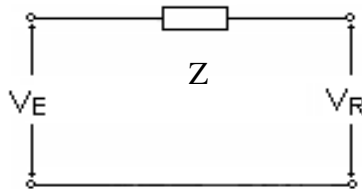
**Figura 2.4.** Circuito equivalente líneas medias.

$$\hat{Z} = Z \quad (2.7)$$

$$\frac{\hat{Y}}{2} = \frac{Y}{2} \quad (2.8)$$

### 2.2.3. Líneas Cortas.

Para líneas aéreas más cortas que 50 millas, se omite la capacitancia shunt en los modelos presentados anteriormente, no afectaran grandemente el resultado de flujo de carga, corto circuito o cálculos de estabilidad.



**Figura 2.5.** Circuito equivalente líneas cortas.

Donde:

$r$  = Es la resistencia efectiva en ohms por unidad de longitud

$g$  = Es la conductancia paralelo neutra en siemens por unidad de longitud

$l$  = Es la longitud total de la línea

$b$  = Es la susceptancia capacitava en siemens  $b = 2jfC$

$L$  = Es la inductancia total del conductor en por unidad de longitud

$c$  = Es la inductancia paralelo del conductor en farads en por unidad

$z = r+jx$  Es la impedancia serie en ohms en por unidad

$y = g+jb$  Es la admitancia paralelo en siemens en por unidad

$Z = zl$  Es la impedancia total serie en ohms en por unidad de longitud.

$Y = yl$  Es la admitancia total paralelo en siemens en por unidad de longitud

$V_E$  = Voltaje en el extremo emisor.

$V_R$  = Voltaje en el extremo receptor.

## 2.3. CONFIGURACIONES DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.

La selección de la protección de una línea de transmisión está determinada por su configuración y su conexión al SEP (Sistema Eléctrico de Potencia). Estos aspectos se definen con los criterios de diseño del proyecto y de la operación prevista para la línea. Las configuraciones utilizadas en el SEIN (Sistema eléctrico interconectado nacional) son las siguientes:

### 2.3.1. Líneas de dos terminales.

La configuración básica de una línea es con dos terminales, ya sea una interconexión o una alimentación radial, según se tenga, un flujo bidireccional o unidireccional respectivamente.

No es recomendable la configuración con más de dos terminales porque los sistemas de protección son muy sofisticados.

Una línea debe ser considerada como un circuito que tiene solamente dos extremos, dos subestaciones bien definidas donde se cuenta con los Interruptores para la maniobra y protección del correspondiente circuito. Se puede considerar las siguientes variantes:

### **2.3.2. Líneas en anillo.**

La configuración básica de una línea es con dos terminales que puede ser alimentada desde ambos extremos, como una interconexión donde se tiene un flujo bidireccional. En consecuencia, una línea que forma parte de un anillo corresponde a la configuración general ya que tiene alimentación por ambos extremos.

### **2.3.3. Líneas paralelas de dos o más circuitos.**

En los sistemas eléctricos se suele utilizar líneas paralelas que están instaladas en una misma trayectoria e incluso utilizan las mismas estructuras y soportes. La protección de estas líneas es afectada por el acoplamiento mutuo entre ambos circuitos. Este acoplamiento no es significativo para las corrientes de secuencia positiva y negativa, sobre todo si las líneas cuentan con transposiciones, lo que significa que están adecuadamente compensadas. Sin embargo, las corrientes homopolares son corrientes iguales en las tres fases y sus efectos de acoplamiento electromagnético se suman en la línea paralela; por tanto, se tendrá un acoplamiento mutuo para las fallas a tierra.

**Líneas con transformadores en derivación.** La instalación de transformadores en derivación solo es aceptable en niveles menores a 220 kv, siempre que sean de bajo valor de potencia, de manera que la impedancia de los transformadores sea mucho mayor que la impedancia de la línea. El criterio general es que la primera zona de la protección de distancia de la línea no alcance más del 20% de la impedancia del transformador.

Se recomienda el grupo de conexión en delta en el lado primario conectado a la línea ya que cuando se tiene la conexión estrella con el neutro a tierra, el transformador constituye una fuente de corriente homopolar para las fallas en la línea.

**Líneas con compensación en derivación.** Es frecuente hacer una compensación de las líneas de transmisión, de manera de mejorar su desempeño tanto durante las maniobras de energización como en la operación en estado permanente. Lo más usual se suele utilizar

reactores en derivación. Estos equipos son parte de la subestación donde están instalados y deben contar con una protección dedicada para los mismos.

Un reactor en derivación debe tener una protección unitaria y rápida, independientemente que esté conectado a la línea o a la barra. Si el reactor está conectado dentro de la línea; es decir, la derivación al reactor está antes de la llegada de la línea, de manera que el relé de la línea mide la corriente incluyendo la compensación, entonces la protección de la línea debe considerar que existe esta posibilidad operativa. En este caso, una falla dentro del reactor será también vista por la protección de la línea.

Por otro lado se requiere que la protección del reactor sea bastante rápida. Además, se debe tener en cuenta que puede haber corrientes oscilantes entre la línea y el reactor que no deben afectar el desempeño de la protección de la línea.

Por otro lado, cuando se efectúa un recierre en líneas largas, es posible que después de la apertura de la fase fallada no se extinga el arco porque se sigue teniendo energía a través de las fases sanas. En este caso, se puede usar un reactor adicional conectado en el neutro del reactor en derivación. Este reactor del neutro se dimensiona para provocar que la corriente del arco secundario sea lo suficientemente baja para permitir su extinción.

**Líneas con compensación serie.** Los capacitores serie suelen estar diseñados para compensar del 25% al 75% de la impedancia serie de la línea y deben estar convenientemente conectados a la línea con la finalidad de no afectar el desempeño del sistema de protección.

## **2.4. COMPORTAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN.**

Un sistema de protección debe tener varias características de comportamiento para que pueda asegurar el cumplimiento de sus funciones. Las principales son:

**A) Sensibilidad**

Es la capacidad de detectar una falla por muy pequeña o incipiente que sea. La mayor sensibilidad viene a ser la capacidad para diferenciar una situación de falla con una situación de no existencia de falla.

**B) Selectividad**

Es la capacidad de detectar una falla dentro de la zona de protección. La mayor selectividad viene a ser la capacidad de descartar una falla cercana a la zona de protección.

**C) Velocidad**

Es la capacidad de respuesta con el mínimo tiempo. La necesidad de tener una rápida respuesta está relacionada con la minimización de los daños por causa de la falla.

**D) Dependability**

Es la capacidad de actuar correctamente cuando sea necesario, aún cuando en condiciones de falla se produzcan tensiones y corrientes transitorias que puedan perjudicar la capacidad de detección de la falla.

**E) Seguridad**

Es la capacidad de no actuar cuando no es necesario, aún cuando en condiciones de falla se produzcan tensiones y corrientes transitorias, las cuales puedan ocasionar errores en la discriminación de la falla dentro de la zona de protección.

**F) Capacidad de Registro**

Es la capacidad de almacenar información relativa a la falla con la finalidad de proporcionar datos de las fallas.

**2.5. ENLACES DE COMUNICACIONES.**

Los enlaces de comunicación de teleprotección tienen por finalidad comunicar a los relés de dos subestaciones que se encuentran en los extremos de una línea de transmisión. Estos enlaces sirven para establecer una lógica en la operación de los relés sobre la base de la información recibida del extremo remoto.



### **2.5.1. Características Funcionales.**

Para cumplir con su propósito, los Enlaces de comunicaciones deben cumplir con los siguientes requisitos funcionales:

- Transmitir las señales en condiciones adversas de señal/ruido debido a la presencia de las líneas de alta tensión energizadas a 60 Hz, las cuales están además expuestas a cortocircuitos a tierra, así como a descargas atmosféricas.
- Transmitir las señales en condiciones adversas incluyendo la posibilidad de ruptura de uno de los conductores de la línea de alta tensión.
- Transmitir las señales de teleprotección en canales de transmisión de datos y de voz, priorizando las funciones de protección en condiciones de falla.

### **2.5.2. Características requeridas por los Sistemas de Protección.**

Los enlaces de comunicaciones serán de los siguientes tipos: onda portadora, fibra óptica, microondas y radio digital. Se requiere por lo menos dos canales de teleprotección con frecuencias de operación diferentes: uno para la protección primaria y otro para la protección secundaria. En total se tendrá un mínimo de cuatro señales de teleprotección.

La utilización de sistemas de transferencia de disparo directo será efectuando la utilización de dos señales en paralelo, una en cada uno de los dos canales de frecuencia diferentes.

Los sistemas de comunicaciones que se utilizan para la teleprotección son básicamente los siguientes:

#### **2.5.2.1. Hilo Piloto**

El sistema de hilo piloto consiste de un par de hilos instalados en una línea aérea o cable subterráneo para transmitir señales como las corrientes, tensiones y/o los valores de fase. Este sistema tiene el inconveniente de estar expuesto a la permanente interferencia de

la línea de transmisión y es más crítico durante las fallas, en las cuales se puede presentar altas tensiones inducidas.

Para evitar la interferencia con la línea de transmisión muchas veces se prefiere emplear una ruta diferente de la línea, lo que trae consigo otras complicaciones para su realización.

La transmisión puede ser efectuada en corriente alterna a la frecuencia del sistema; pero, a veces se emplea señales moduladas en una frecuencia de audio (2 Khz.) o en corriente continua.

### **2.5.2.2. Onda Portadora**

El sistema de onda portadora envía señales de alta frecuencia utilizando la misma línea de transmisión como medio para las telecomunicaciones. Para ello, los equipos transmisores/receptores de onda portadora son acoplados a la línea de transmisión a través de un capacitor (que usualmente es el mismo del transformador de tensión capacitivo) y se filtra a la entrada de las señales a la subestación mediante una trampa de onda. Se debe mencionar que las cuchillas de puesta a tierra de la línea están ubicadas fuera del enlace de telecomunicaciones por lo que la puesta a tierra de la línea no le afecta a la transmisión de la alta frecuencia.

Este sistema también tiene el inconveniente de estar expuesto a la interferencia de la línea de transmisión. En la operación permanente el ruido del efecto corona causa interferencia; pero, durante las fallas puede ser más crítica la transmisión, ya que la propia falla puede ser causa de una gran atenuación de la señal. Por esta razón no se utiliza acoplamientos sencillos (fase-tierra) sino que se prefiere acoplamientos redundantes (fase-fase).

### **2.5.2.3. Fibra Óptica**

El sistema de fibra óptica utiliza una fina fibra de vidrio (óxido de silicio y germanio), la cual tiene una baja atenuación a las ondas de luz que pueden viajar en su interior, debido a su alto índice de refracción y está rodeado de un material similar con un índice de refracción menor. De esta manera el cable de fibra óptica actúa como una guía de onda de la luz introducida por un láser, o por un diodo emisor de luz (Led).

El cable de fibra óptica suele ser instalado dentro del cable de guarda de la línea de transmisión, ya que por tratarse de la transmisión de luz es totalmente inmune a las interferencias electromagnéticas de la línea. Además, los relés normalmente están preparados para un acoplamiento directo a la fibra óptica. Por estas razones, este medio resulta de muy fácil aplicación e integración a la protección de las líneas de transmisión.

Existen enlaces de distinta capacidad y en una aplicación específica de protección, donde se utiliza señales analógicas y lógicas, es usual emplear enlaces de mediana capacidad con una velocidad de transmisión de 64 kbits/segundo. Sin embargo, existen enlaces de hasta 2 Mbits/segundo.

.

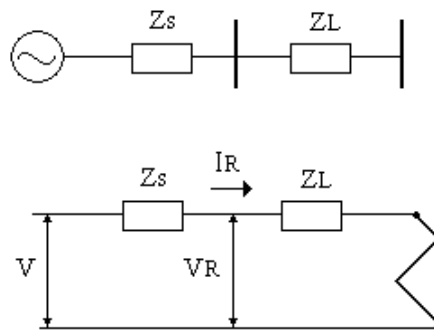
### **2.5.2.4. Radio UHF**

El sistema de radio usado para las telecomunicaciones envía señales en una banda que requiere una línea de visión entre ambos puntos extremos por tanto, muchas veces es necesario utilizar estaciones repetidoras. Este sistema, por su naturaleza, es totalmente inmune a las interferencias electromagnéticas de la línea

El radio transmite sus señales en el rango de 1350 Mhz – 39500 Mhz, aunque también se utiliza la banda de 380 Mhz – 470 Mhz. cada enlace utiliza un ancho de banda que puede ser de 200 Mhz hasta 2500 Mhz, según la aplicación.

## 2.6. IMPEDANCIA DE FALLA.

Cuando la línea es corta, la resistencia de falla resulta comparable con la impedancia de la línea por lo que la medición de su impedancia se ve afectada por dicha resistencia. Una manera de ponderar la impedancia de la línea es compararla con respecto a la impedancia de la fuente, ya que cuanto menor es la impedancia de la línea menor es la tensión que se obtiene al medir su impedancia, dificultándose su evaluación. Para analizar este aspecto se puede considerar el circuito de un sistema al cual se conecta una simple línea con un relé que mide la tensión y la corriente en la línea.



**Figura 2.6.** Tensión en el Relé de Distancia para una Falla en la Línea.

Si se tiene un cortocircuito al final de la línea, sin considerar la resistencia de falla, la tensión que mide el relé será:

$$V_R = \frac{Z_L V}{Z_S + Z_L} = \frac{V}{\frac{Z_S + 1}{Z_L}} \quad (2.9)$$

Donde:

$V$  = Tensión de la fuente.

$V_R$  = Tensión en el relé.

$Z_L$  = Impedancia de la línea.

$Z_S$  = Impedancia de la fuente.

## **2.7. DISPAROS Y SEÑALIZACIÓN DE FALLA.**

Al producirse una falla fase-tierra el relé detecta la falla y si ha efectuado la correcta selección de fase puede proceder con una apertura monopolar con la finalidad de proceder a un recierre. También se puede efectuar un recierre tripolar. En ambos casos se debe hacer una verificación de sincronismo o una supervisión de tensión, a fin de que no se produzca un segundo recierre sobre falla.

## **2.8. DISCRETIZACIÓN DE SEÑALES.**

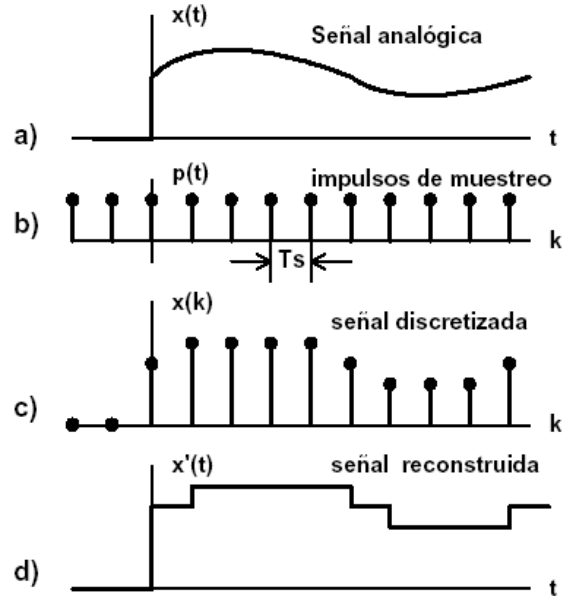
Una señal de tiempo discreto  $x(k)$  puede representar un fenómeno para el cual la variable independiente es inherentemente discreta. Señales tales como las relaciones especie-abundancia, o los datos demográficos o indicadores económicos ya mencionados, son ejemplos típicos de estas señales. Por otro lado, una señal de tiempo discreto puede representar muestras de un fenómeno para el cual la variable independiente es en realidad continua.

### **2.8.1. El proceso de muestreo.**

El proceso a través del cual una señal continua  $x(t)$  es transformada en una señal discreta "equivalente"  $x(k)$  consiste simplemente en la toma de muestras de la señal continua en instantes discretos de tiempo  $k$  denominados instantes de muestreo  $k = \{\dots, -1, 0, 1, 2, 3, \dots\}$ .

El proceso de muestreo se muestra en la figura 2.7. Para realizar dicho proceso es necesaria una señal adicional que marque el ritmo de la toma de muestras, idealmente dicha señal  $p(t)$  es un tren de impulsos con una frecuencia  $f_s = 1/T_s$  denominada frecuencia de muestreo (en Hertz). También es usual considerar dicha frecuencia en radianes/seg. .

El muestreo puede ser uniforme ( $T_s$  constante)  $f_s = 1 / T_s$  o no uniforme ( $T_s$  variable). a  $T_s$  se le llama también el periodo de muestreo.



**Figura 2.7** El proceso de muestreo.

## 2.9. PROTECCIÓN DE DISTANCIA. [14]

La protección de distancia utiliza las corrientes y tensiones para calcular permanentemente las impedancias vistas en el extremo de la línea. De esta manera, al producirse una falla dentro de la línea se puede determinar si la impedancia medida por el relé está dentro de la zona protegida (que es la impedancia total o parcial de la línea).

En la operación normal se tiene la línea con su carga conectada al final de la misma; luego, si se produce una falla dentro de la línea, la impedancia vista por el relé será una fracción de la impedancia de la línea. el relé tiene la capacidad de ver fallas más allá de la línea protegida; pero, su actuación dependerá de su ajuste.

La protección de distancia se prefiere a la protección de sobre corriente porque la utilización de esta última depende fundamentalmente de las corrientes de cortocircuito, por lo cual resulta a veces muy difícil de aplicar hay varios tipos de protección de distancia, los principales son los siguientes:

### **2.9.1. Característica de mínima Impedancia**

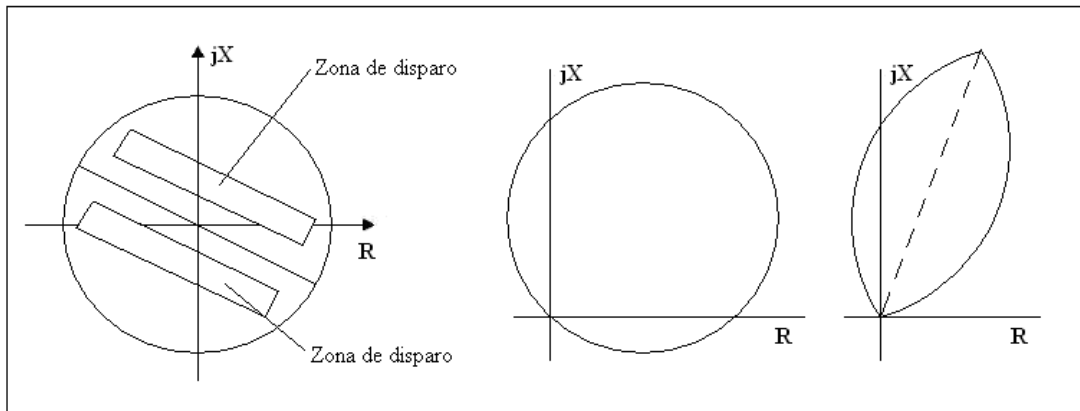
Mide la relación entre la tensión y la corriente sin considerar ningún ángulo de fase. Su característica es un círculo en el plano R-X y opera cuando las impedancias medidas están dentro de este círculo. Si se desea obtener direccionalidad se necesita una característica complementaria adicional. Ver figura 2.8.

### **2.9.2. Característica Mho**

Su característica es un círculo que pasa por el origen en el plano R-X y su diámetro tiene un ángulo especificado similar al de las líneas de transmisión. Es direccional por naturaleza y opera cuando las impedancias medidas están dentro de este círculo. Ver figura 2.8. A veces se modifica la característica para desplazar ligeramente el círculo, de manera que no pase por el origen. A esta característica modificada se le denomina Mho desplazado (offset).

### **2.9.3. Característica Lenticular**

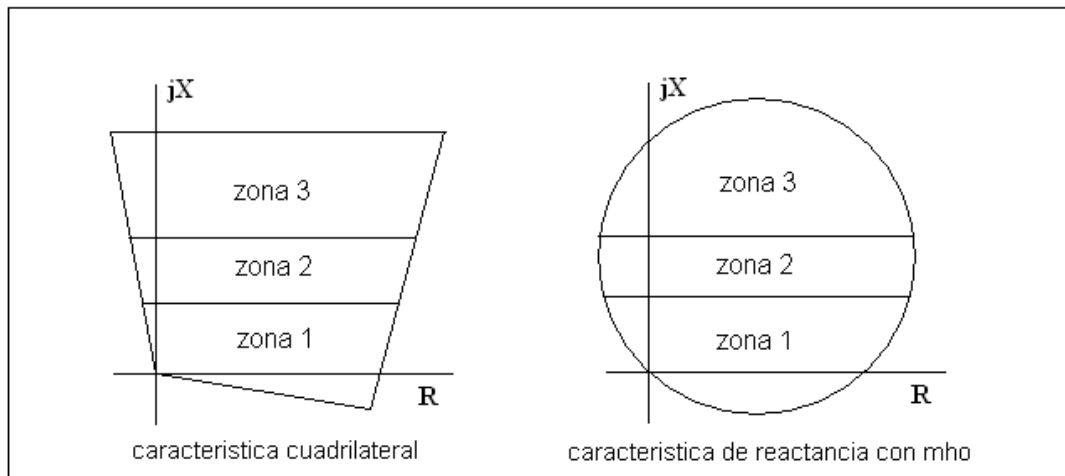
Su característica es una superposición de dos características circulares para constituir una forma de lente. Es direccional por naturaleza y opera cuando las impedancias medidas están dentro de la zona formada por la lente. Ver figura 2.8.



**Figura 2.8.** Relés con característica Impedancia, Mho y Lenticular.

**2.9.4. Característica Cuadrilateral**

Esta característica se consigue con una combinación de características de reactancia direccionales con controles de los alcances resistivos. Es direccional por naturaleza y opera cuando las impedancias medidas están dentro del cuadrilátero. ver figura 2.9.



**Figura 2.9.** Relés de Distancia con Característica de Reactancia.

**2.9.5. Característica Reactancia con Mho.**

Esta característica se consigue con una combinación de características de reactancia direccionales con un control de característica Mho. Es direccional por naturaleza y opera cuando las impedancias medidas están dentro de este círculo. .



Los relés de distancia operan normalmente siguiendo una secuencia de arranque, medición y selección de fase. Para ello, normalmente cuentan con tres unidades de medida fase-fase independientes en cada zona. Las impedancias fase-tierra pueden ser calculadas según el circuito donde se tiene:

$$V_a = I_a * Z_a - I_E * Z_E \quad (2.10)$$

Donde:

$V_a$  = Tensión de fase a.

$I_a$  = Corriente de fase a.

$Z_a$  = Impedancia de fase a.

$I_E$  = Corriente de retorno por tierra.

$Z_E$  = Impedancia de retorno por tierra.

Luego, la impedancia vista por el relé será:

$$Z_a = \frac{V_a}{I_a + \left(\frac{Z_E}{Z_a}\right) \cdot I_E} \quad (2.11)$$

Se debe notar que el valor de la impedancia  $Z_a$  que se mide en el momento de una falla depende de la longitud de la línea hasta el punto de falla, mientras que la relación de  $(Z_E/Z_a)$  no depende de la longitud de la línea sino solo de los parámetros de la línea.

Se debe tomar también que el flujo de potencia por la línea, en condiciones de pre-falla, tiene una influencia en la medida de la impedancia vista por el relé cuando se tiene una falla con alto valor de la resistencia de puesta a tierra. Para ello, se puede considerar el circuito de la figura 2.9.

Durante el cortocircuito se tiene la superposición de la corriente del flujo de potencia de pre-falla con la corriente de falla que fluye por la resistencia de falla y la impedancia vista por el relé que tiene dos componentes:

- La impedancia correspondiente a la longitud de la línea hasta el punto de falla
- La resistencia de falla afectada de un factor que es igual a la relación entre la Corriente de falla y la corriente del relé.

En consecuencia, este segundo componente será puramente resistivo solamente si las corrientes de falla y del rele tienen el mismo ángulo de fase, lo que significa que se puede tener un sobre alcance o un subalcance en la medición total del relé.

## 2.10. TIPOS DE FILTROS

Existen distintos tipos de clasificación de filtros para la obtención de funciones que tienen sobre su frecuencia natural frecuencias en múltiplos de su frecuencia, estos tipos de filtros son los siguientes:

- Atendiendo a la ganancia:
  - Filtros pasivos: los que atenuarán la señal en mayor o menor grado. Se implementan con componentes pasivos como condensadores, bobinas y resistencias.
  - Filtros activos: son los que pueden presentar ganancia en toda o parte de la señal de salida respecto a la de entrada. En su implementación suelen aparecer amplificadores operacionales.
- Atendiendo a su respuesta en frecuencia:
  - Filtro paso bajo: Es aquel que permite el paso de frecuencias bajas, desde frecuencia 0 o continua hasta una determinada. Presentan ceros a alta frecuencia y polos a bajas frecuencia.
  - Filtro paso alto: Es el que permite el paso de frecuencias desde una frecuencia de corte determinada hacia arriba, sin que exista un límite

superior especificado. Presentan ceros a bajas frecuencias y polos a altas frecuencias.

- Filtro paso banda: Son aquellos que permiten el paso de componentes frecuenciales contenidos en un determinado rango de frecuencias, comprendido entre una frecuencia de corte superior y otra inferior.
  - Filtro elimina banda: Es el que dificulta el paso de componentes frecuenciales contenidos en un determinado rango de frecuencias, comprendido entre una frecuencia de corte superior y otra inferior.
  - Filtro multibanda: Es que presenta varios rangos de frecuencias en los cuales hay un comportamiento diferente
  - Filtro variable: Es aquel que puede cambiar sus márgenes de frecuencia
- Atendiendo al método de diseño: [12]
- Filtro de Butterworth
  - Filtro de Chevyshev I y Filtro de Chevyshev II
  - Filtro de Cauer (elíptico)
  - Filtro de Bessel
- Atendiendo a su aplicación:
- Filtro de red. Este tipo de circuito impide la entrada de ruido externo, además impide que el sistema contamine la red, de tal forma que se pueden utilizar fuentes analógicas y digitales o fuentes PWM que afecten negativamente el resto del equipo. También es posible corregir el factor de potencia ya que el circuito reduce significativamente los picos de corriente generados por el condensador al cargarse. El circuito consiste básicamente en un filtro paso bajo en donde la primera bobina elimina ruido en general (frecuencias altas), junto con los condensadores. El transformador elimina el ruido sobrante, que los condensadores no eliminan. Al transformador se le denomina choque de modo común. Son los utilizados para garantizar la

calidad de la señal de alimentación, éstos tienen como objetivo eliminar ruidos tanto en modo común como en modo diferencial.

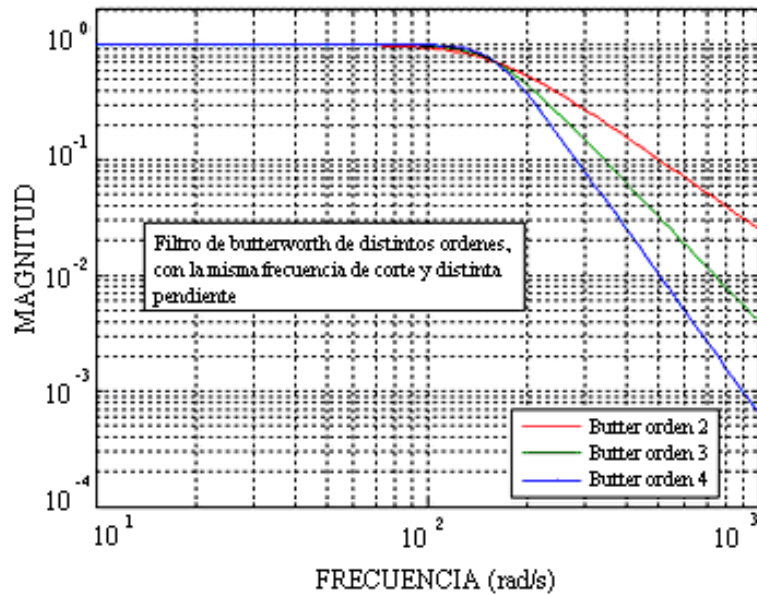
➤ Otros tipos:

- Filtros piezoeléctricos. Este filtro aprovecha las propiedades resonantes de determinados materiales como el cuarzo. Este cristal de cuarzo se utiliza como componente de control de la frecuencia de circuitos osciladores convirtiendo las vibraciones mecánicas en voltajes eléctricos a una frecuencia específica. Esto ocurre debido al efecto piezoeléctrico. En un material piezoeléctrico, al aplicar una presión mecánica sobre un eje, dará como consecuencia la creación de una carga eléctrica. En algunos materiales, se encuentra que aplicando un campo eléctrico según un eje, produce una deformación mecánica según otro eje ubicado a un ángulo recto respecto al primero. Por las propiedades mecánicas, eléctricas, y químicas, el cuarzo es el material más apropiado para fabricar dispositivos con frecuencia bien controlada. También existen filtros como el de ferrita que existe en muchos cables. Es normal encontrárselos en las pantallas del computador. Aquí se tiene la propiedad de presentar distintas impedancias a alta y baja frecuencia.

### **2.10.1. Filtro de Butterworth**

El filtro de Butterworth es uno de los filtros electrónicos más básicos, diseñado para producir la respuesta más plana que sea posible hasta la frecuencia de corte. En otras palabras, la salida se mantiene constante casi hasta la frecuencia de corte, luego disminuye a razón de  $20n$  dB por década, donde  $n$  es el número de polos del filtro.

El filtro de Butterworth más básico es el típico filtro pasa bajo de primer orden, el cual puede ser modificado a un filtro pasa alto o añadir en serie otros formando un filtro pasa banda o elimina banda y filtros de mayores órdenes.



**Figura 2.10.** *Filtros de Butterworth de varios órdenes.*

Según lo mencionado antes, la respuesta en frecuencia del filtro es máximamente plana (con las mínimas ondulaciones) en la banda pasante. Visto en un diagrama de Bode con escala logarítmica, la respuesta decae linealmente desde la frecuencia de corte hacia menos infinito. Para un filtro de primer orden son -6dB por octava o -20db por década.

El filtro de Butterworth es el único filtro que mantiene su forma para órdenes mayores (sólo con una caída de más pendiente a partir de la frecuencia de corte).

Este tipo de filtros necesita un mayor orden para los mismos requerimientos en comparación con otros.