

## Módulo Uno

Esquemas de protección y medición para líneas de transmisión y subestaciones eléctricas

### Bloque Uno

Filosofía y principios básicos de protecciones



<b>Objetivo</b>	1
<b>Introducción</b>	1
<b>Contenido</b>	1
<b>1. Sistema eléctrico de potencia (SEP)</b>	
1.1 Definición de sistema eléctrico de potencia	1
1.2 Elementos principales de un sistema eléctrico de potencia	2
1.3 Estructura funcional de un sistema eléctrico de potencia (SEP)	4
1.4 Causas de fallas en subestaciones y líneas de transmisión	4
1.5 Tipos de fallas en sistemas eléctricos	6
<b>2. Sistema de protección</b>	7
2.1 Definición de sistema de protección	7
2.2 Objetivos principales para utilizar los sistemas de protección	7
2.3 Características generales de los sistemas de protección	8
2.4 Requerimientos básicos de los sistemas de protección	8
2.5 Elementos que integran un sistema de protección	8
2.6 Causas principales que pueden ocasionar fallas en los sistemas de protección	10
2.7 Causas principales de fallas en los interruptores de un sistema de protección	11
<b>3. Filosofía de protección por medio de relevadores</b>	11
3.1 La protección por medio de relevadores	11
3.2 Zonas de protección a los diferentes esquemas a proteger	12
3.3 Traslape de zonas de protección	14
3.4 Esquema de protección primaria y de respaldo	15
3.5 Requerimientos para la aplicación de los esquemas de protección	17
3.6 Conexiones típicas de circuitos de protección	18
<b>Obras de consulta</b>	18

## Objetivo

Al finalizar el tema, el participante podrá reconocer los conceptos y definiciones sobre la protección de sistemas eléctricos de potencia, identificar las causas principales que pueden originar fallas en subestaciones y líneas de transmisión, los tipos y naturaleza de las fallas en un sistema eléctrico, así como las características generales y los requerimientos básicos de los sistemas de protección.

## Introducción

En la presente unidad se proporcionarán al supervisor de obra una breve introducción que le permita comprender los cuatro procesos operativos que componen el Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), poniendo especial énfasis en el sistema de protección, del cual se explicarán sus características, requerimientos, elementos que lo integran así como las causas que pueden ocasionar fallas al mismo. Por último, en esta unidad también se describirá la protección por medio de relevadores y las zonas de protección.

### 1. Sistema eléctrico de potencia (Sep)

#### 1.1 Definición de sistema eléctrico de potencia

El sistema eléctrico de potencia es un conjunto de elementos utilizados para generar, transformar, transmitir, distribuir y utilizar la energía eléctrica de tal manera que se logre con la más alta calidad y al menor costo posible.

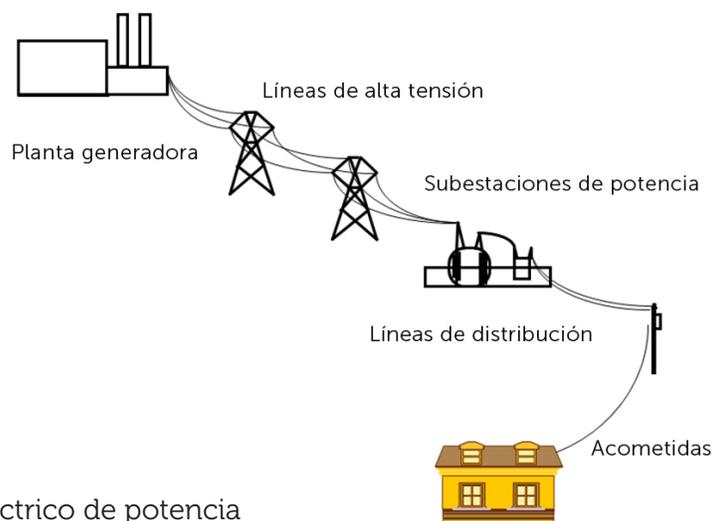


Figura 1. Sistema eléctrico de potencia



## 1.2 Elementos principales de un sistema eléctrico de potencia

El sistema eléctrico de potencia (SEP) está compuesto, principalmente, por los siguientes elementos:

Máquinas rotatorias (Generadores)	 <p>Figura 2. Máquinas rotatorias</p>
Transformadores (elevadores o reductores de tensión kV)	 <p>Figura 3. Transformadores</p>
Barras colectoras (Buses)	 <p>Figura 4. Barras colectoras</p>
Líneas de transmisión (alimentación de 400 y 230kV)	 <p>Figura 5. Línea de transmisión</p>

Líneas de subtransmisión  
(alimentación de 115kV)



Figura 6. Líneas de subtransmisión

Líneas de distribución  
(alimentación de 34 y 13.8kV)



Figura 7. Líneas de distribución

Reactores



Figura 8. Reactores

Capacitores)



Figura 9. Capacitores



### 1.3 Estructura funcional de un sistema eléctrico de potencia (SEP)

Desde el punto de vista de operación del sistema, se puede considerar que está formado por cuatro procesos operativos, como se muestra en la siguiente figura:

Sistema eléctrico de potencia

Generación, líneas de transmisión y subestaciones eléctricas	Sistema de protección y medición	Sistemas de control supervisorio	Sistemas de comunicación
La generación, líneas de transmisión y subestaciones eléctricas se encargan de producir, transmitir y distribuir la energía eléctrica.	El sistema de protección y medición cuyo rasgo distintivo es su velocidad de operación. El equipo de protección actúa para abrir o cerrar interruptores que modifican la estructura del sistema eléctrico.	Mientras que el proceso de control supervisorio actúa continuamente en el monitoreo de alarmas, control (apertura – cierre, subir - bajar) y medición de variables del sistema eléctrico de potencia.	El sistema de comunicación se encarga de recibir y transmitir señales de voz y datos entre las subestaciones eléctricas y los centros de control para proteger, controlar y monitorear los sistemas eléctricos de potencia.

### 1.4 Causas de fallas en subestaciones y líneas de transmisión

Las fallas, además de producir interrupción del servicio eléctrico en zonas de alimentación reducidas, también pueden ser de consecuencias tales que provoquen interrupciones mayores como es la pérdida del suministro de energía eléctrica lo que puede conducir a interrupciones generales, además de que se puede destruir parte de las instalaciones y equipos, lo que resulta muy costoso.

Algunas de las causas más comunes que producen fallas en los equipos y elementos eléctricos de potencia se indican a continuación:

- 1.- Fallas en los aislamientos de las máquinas, aparatos y cables producidas por envejecimiento, calentamiento o corrosión.
- 2.- Fallas en el rompimiento de la rigidez dieléctrica del aire por maniobras o por materiales de máquinas y aparatos debido principalmente a sobretensiones de origen atmosférico, por maniobra de interruptores u oscilaciones de voltaje de operación del sistema.

3.- Efecto de la humedad en el terreno y en el medio ambiente.

4.- Fallas mecánicas en las máquinas, fallas en las líneas de transmisión por efecto del viento, caída de árboles o ramas de árbol en los conductores, accidentes viales, etcétera.

5.- Errores humanos en las maniobras como apertura de cuchillas bajo condiciones de carga, falsas maniobras, etcétera.

6.- Sobre carga en transformadores, generadores y líneas de transmisión.

7.- Accidentes provocados por animales como pájaros en las líneas de transmisión, roedores en cables y tableros, etcétera.

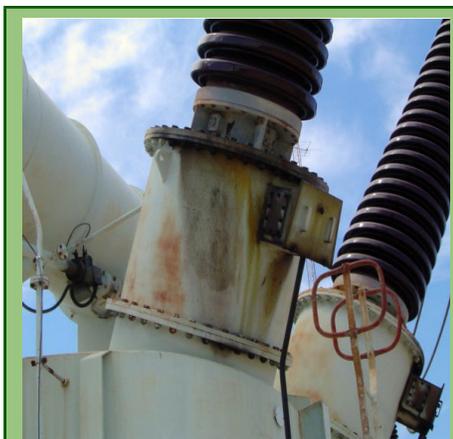


Figura 10. Corrosión



Figura 11. Descarga atmosférica



Figura 12. Accidente vial



Figura 13. Falla de aislamiento



Figura 14. Las fallas pueden producir daños catastróficos



## 1.5 Tipos de fallas en sistemas eléctricos

---

Los tipos y naturaleza de las fallas en un sistema eléctrico trifásico se clasifican en forma normal como:

- Fallas a tierra
  - i) Una fase a tierra
  - ii) Dos fases a tierra
  - iii) Tres fases a tierra
- Fallas entre fases
  - i) Dos fases
  - ii) Tres fases
- Fallas por su tiempo de duración
  - i) Fallas permanentes. Se crean cuando hay perforación o ruptura de aislamientos, ruptura de conductores, objetos o partes haciendo contacto permanente a tierra o con otros conductores.
  - ii) Fallas transitorias. Son de corta duración y están creadas por las sobretensiones transitorias, básicamente están provocadas por los flameos a través de los aislamientos, debidos a los transitorios de sobretensión.
  - iii) Fallas semitransitorias. Están creadas por objetos externos, tales como ramas de árbol o presencia de roedores.

Este tipo de fallas son detectadas por los relevadores de protección y se liberan disparando (apertura del interruptor) los interruptores asociados, después de un cierto tiempo en que se libera la falla los interruptores se pueden cerrar en forma automática (recierre).

## 2. Sistema de protección

Para confinar al mínimo posible las consecuencias de tales fallas, el defecto debe ser rápidamente detectado, localizado y aislado, y se deben tomar las medidas correspondientes para asegurar el suministro continuo de la energía eléctrica a los consumidores.

Actualmente, estas funciones se realizan en forma automática por los sistemas de protección que forman parte importante del equipo auxiliar de la planta eléctrica o subestación.

### 2.1 Definición de sistema de protección

Es un grupo de dispositivos o arreglo de dispositivos que se interconectan o que interaccionan entre sí para proteger los elementos primarios de una subestación eléctrica, detectando condiciones anormales de operación o fallas en el sistema, ejecutando acciones para evitar o reducir daños en las instalaciones mediante la operación de los interruptores, aislando los equipos o aparatos con falla, para mantener la continuidad del servicio eléctrico.

### 2.2 Objetivos principales para utilizar los sistemas de protección

- a) Desconectar la sección fallada del sistema de potencia para prevenir o minimizar efectos posteriores en la operación normal de las partes sanas del sistema.
- b) Minimizar o prevenir daños a los elementos o dispositivos del sistema, con lo que se permite un restablecimiento más rápido del servicio.
- c) Proporcionar uno o más medios alternativos para desconectar del sistema de potencia el equipo fallado, en el poco probable caso de que la protección primaria no opere satisfactoriamente.
- d) Reconocer cuando una falla catastrófica es inminente, o haya ocurrido para dar los pasos necesarios para minimizar el disturbio y facilitar el rápido restablecimiento del servicio en el área afectada.
- e) Generar, transmitir y distribuir energía eléctrica con la máxima disponibilidad y las mínimas interrupciones, de acuerdo con los límites especificados de frecuencia, voltaje y corriente, tomando en cuenta la seguridad y aspectos ambientales.



## 2.3 Características generales de los sistemas de protección

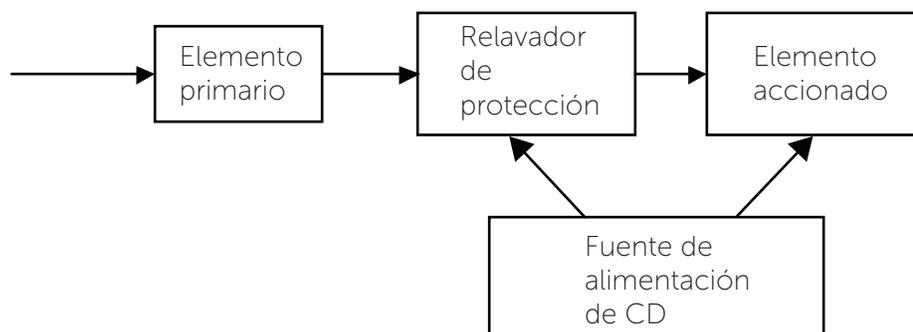
1. En ningún caso, una protección debe operar si no existe falla en su zona a proteger.
2. Si existe falla en su zona, las órdenes deben corresponder exactamente a aquello que se espera, considerando de alguna forma la severidad y localización de la falla.

## 2.4 Requerimientos básicos de los sistemas de protección

- a) **Confiabilidad.** Medida del grado de certeza de que el sistema de protección se va a comportar correctamente.
- b) **Dependabilidad.** Habilidad de un sistema de protección para operar cuando se requiere.
- c) **Seguridad.** Habilidad de un sistema de protección para no operar en forma incorrecta.
- d) **Selectividad.** Habilidad de un sistema de protección para discriminar entre fallas dentro de la zona protegida y fallas externas u otras condiciones de operación.
- e) **Sensibilidad.** Habilidad de un sistema de protección para detectar todas las fallas dentro de los límites del sistema y de las condiciones de falla esperadas.
- f) **Rapidez.** Habilidad de un sistema de protección para operar en el mínimo tiempo posible pero siendo consistente con la confiabilidad y la selectividad.
- g) **Simplicidad.** Este concepto implica instalar la mínima cantidad de equipos y circuitos para lograr lo antes mencionado.

## 2.5 Elementos que integran un sistema de protección

Los elementos que integran el sistema de protección se indican a continuación:



**Elemento primario.** Es el elemento que detecta las señales procedentes de la falla (corriente y voltaje) y las convierte en valores aptos para alimentar al relevador de protección, en general nos referimos a los transformadores de corriente (TC) y a los transformadores de potencial (TP)



Figura 15. Elemento primario

**Relevador de protección.** Es el alma de cualquier sistema de protección, encargado de convertir las señales de entrada procedentes del elemento primario, medir los parámetros y en caso de falla, enviar la señal de disparo al elemento accionado.



Figura 16. Relevador de protección

**Elemento accionado.** Se refiere al elemento que está constituido por un circuito de control a través del cual llega la señal del relevador a las bobinas de disparo de los interruptores, que al energizarse accionan mecánicamente la apertura del interruptor para librar la falla.



Figura 17. Elemento accionado

**Fuente de alimentación de corriente directa.** Los sistemas de protección se alimentan por medio de una fuente de alimentación de voltaje de corriente directa (VCD), que está constituida por bancos de baterías (acumuladores), cargador de baterías y tableros centros de carga de VCD.

En México, CFE utiliza la tensión de 125VCD para alimentar relevadores y circuitos de control de equipos primarios, en algunas instalaciones antiguas se utilizan 250VCD y en casos verdaderamente especiales 48VCD.



Figura 18. Banco de baterías





Figura 19. Tablero de servicios propios



Figura 20. Cargadores de baterías

A modo de resumen de lo arriba mencionado, a continuación te presentamos el diagrama de bloques de la operación elemental de un sistema de protección.

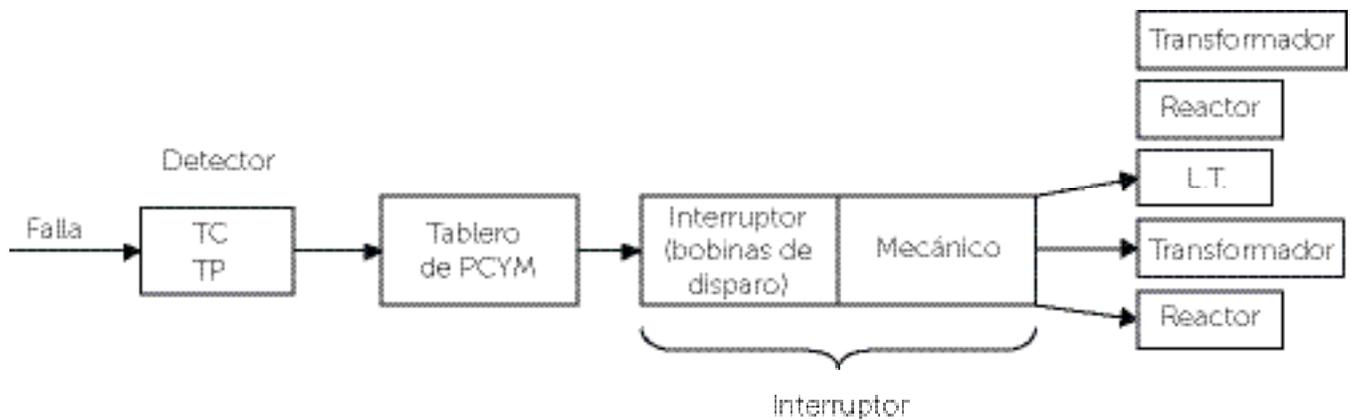


Figura 21. Diagrama de operación elemental de un sistema de protección

## 2.6 Causas principales que pueden ocasionar fallas en los sistemas de protección

- Transformadores de corriente y sus circuitos asociados
  - Saturación
  - Circuito abierto
  - Cortocircuito

- Transformadores de potencial y sus circuitos asociados
  - Cortocircuito
  - Fusible fundido
- Pérdida de alimentación auxiliar de corriente directa por
  - Cortocircuito
  - Circuito abierto
  - Falla de termomagnéticos
- Fallas de relevadores
  - Falla interna
  - Ajuste y configuración erróneas
  - Falla de canal de comunicación

## 2.7 Causas principales de fallas en los interruptores de un sistema de protección

---

1. "Pérdida de la alimentación auxiliar de corriente directa
2. Bobina de disparo abierta
3. Bobina de disparo en cortocircuito
4. Falla mecánica del mecanismo de disparo
5. Incapacidad de los contactos principales para interrumpir la corriente o falla en cámaras interruptivas o elementos de las mismas" (Enriquez H., 2005)

## 3. Filosofía de protección por medio de relevadores

### 3.1 La protección por medio de relevadores

---

La protección por relevadores se utiliza para detectar las fallas en las líneas o los aparatos, e iniciar la operación de los dispositivos de interrupción en los circuitos para aislar los equipos o aparatos con falla. Los relevadores se usan también para detectar condiciones de operación indeseable o anormal, además de las causadas por el equipo en falla, ya sea que operen una alarma o inicien la operación de los interruptores. Los relevadores de protección protegen al sistema eléctrico desconectando las líneas o equipos en falla, de manera que se minimice el efecto de la falla y se mantenga la continuidad del servicio en el resto del sistema.



### 3.2 Zonas de protección a los diferentes esquemas a proteger

Los sistemas de potencia se dividen en zonas de protección, tal como se muestra en la figura con las regiones siguientes:

- Zona de protección del transformador
- Zona de protección de la barra
- Zona de protección de las líneas (transmisión, subtransmisión, distribución)
- Zona de protección de bancos de capacitores o de reactores

La filosofía de la protección consiste en dividir el sistema en áreas o zonas de protección, de tal forma, que no quede un solo punto en el sistema fuera del área. Para lograr esto, las zonas deben quedar traslapadas.

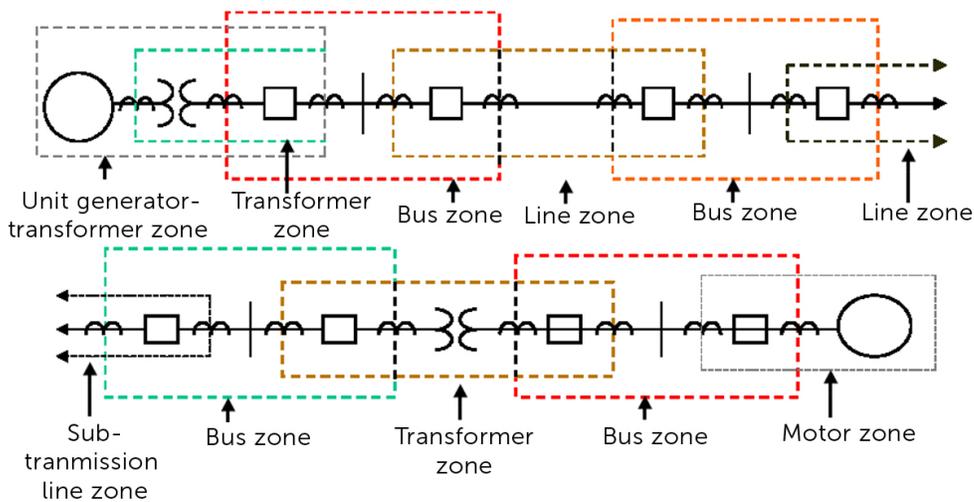


Figura 22. Un sistema típico y sus zonas de protección

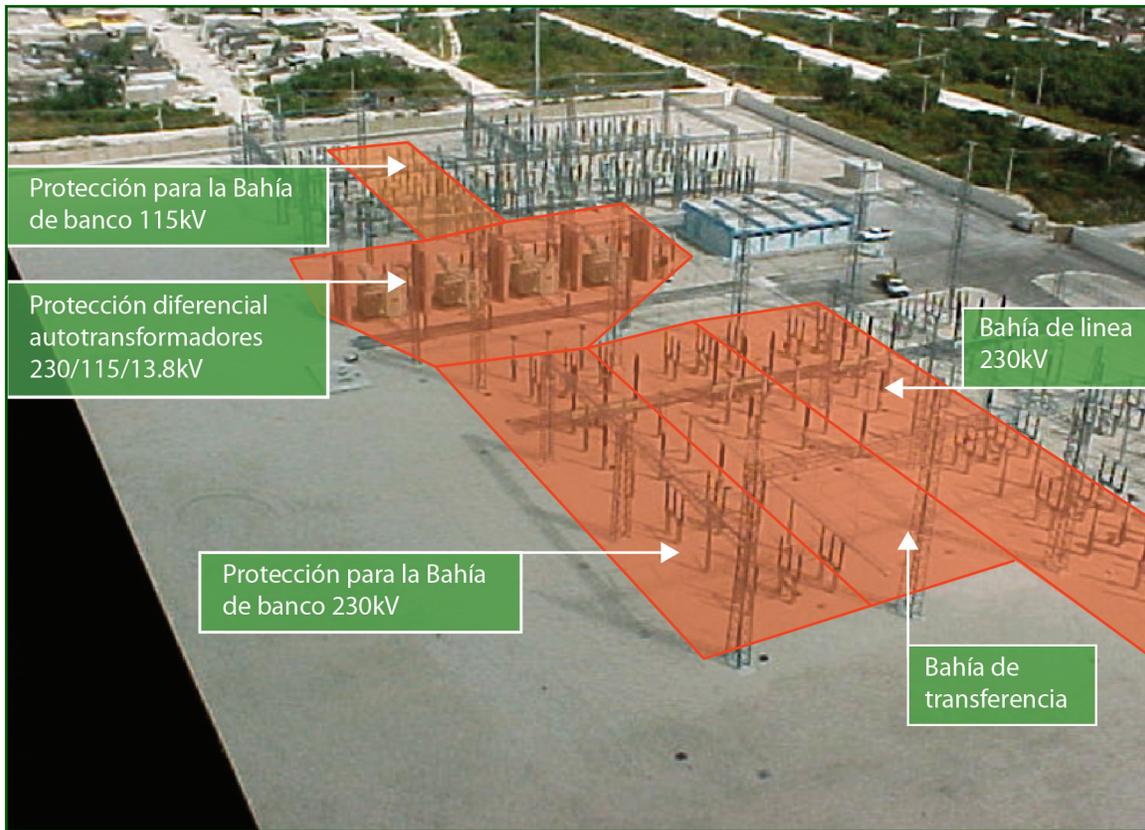


Figura 23. Zonas de protección dentro de una subestación

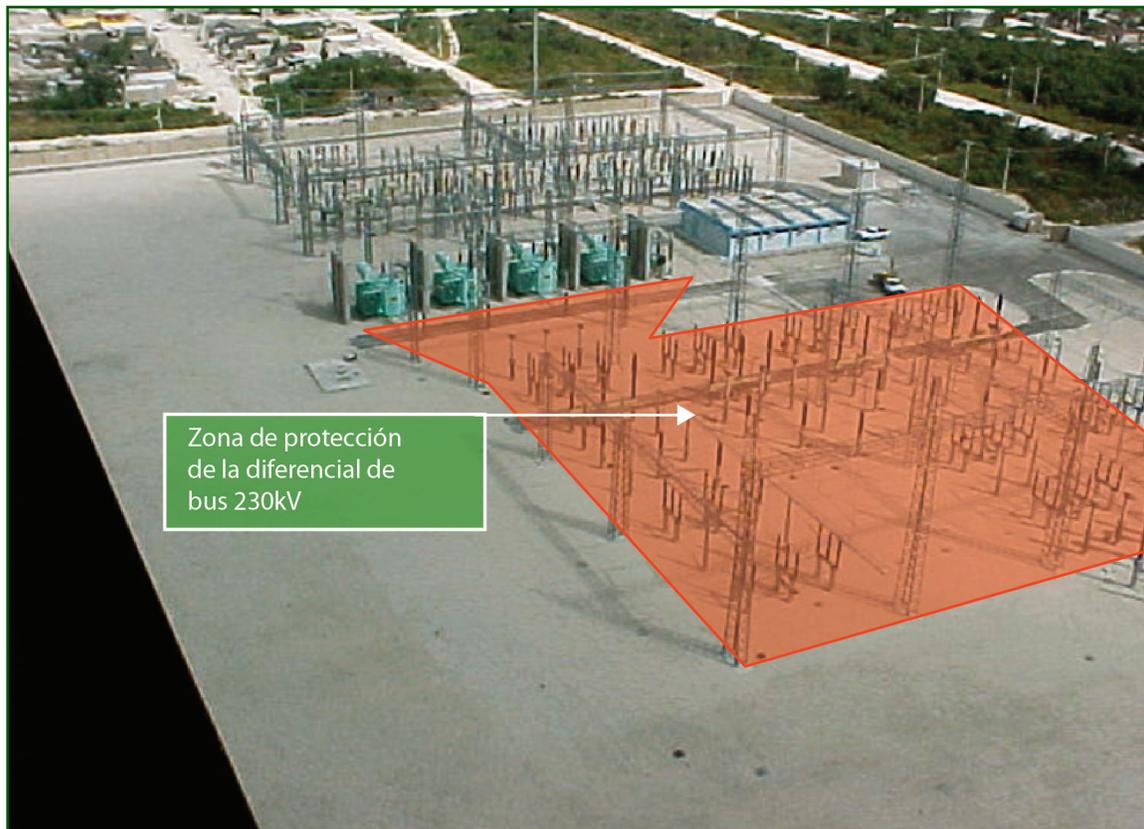


Figura 24. Zonas de protección dentro de una subestación

Los relevadores generalmente tienen entradas provenientes de transformadores de corriente (TC), de modo que la zona protegida es acotada por estos transformadores de corriente. Los TC representan una ventana a través de la cual los relevadores asociados ven el sistema eléctrico dentro de la zona protegida, los interruptores permiten desconectar los elementos dentro de la zona protegida para aislar la falla. La frontera de una zona protegida es definida por un transformador de corriente y un interruptor. Cuando el TC y el interruptor están separados, se debe tener cuidado en el sistema de comunicaciones para lograr los disparos de interruptores deseados.

Para proteger integralmente un sistema de potencia, la definición de zonas protegidas debe cumplir los siguientes requisitos:

1. Cada elemento del sistema debe estar incluido en al menos una zona protegida. Los elementos más importantes deben estar contenidos en al menos dos zonas protegidas, como buena práctica.
2. Para evitar que algún elemento se quede sin protección, las zonas de protección se deben traslapar. Sin dicho traslape, la frontera entre dos zonas protegidas puede quedar sin protección. Se debe procurar que la región de traslape sea pequeña, de modo que la posibilidad de ocurrencia de una falla en la zona de traslape se minimice.

### 3.3 Traslape de zonas de protección

Los sistemas de potencia se dividen en zonas de protección, tal como se muestra en la figura. El traslape de las zonas se logra con los transformadores de corriente (TC) como se ve en los siguientes casos:

**Caso 1.** Un caso típico es cuando tenemos interruptores de tanque muerto con TC integrados (tipo dona).

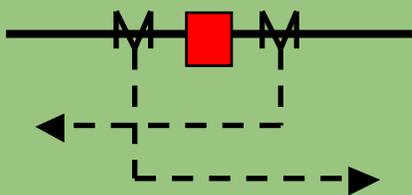


Figura. Esquema de TC a cada lado de un interruptor

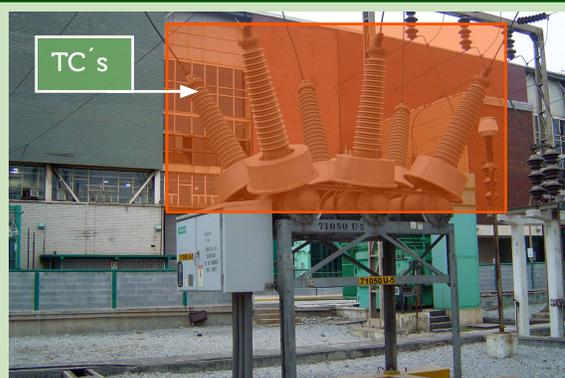


Figura 25. Transformador de corriente

**Caso 2.** Cuando se tienen TC fuera del interruptor (pedestal)

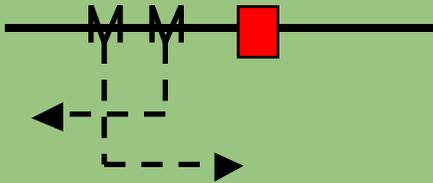


Figura. Esquema de TC fuera del interruptor



Figura 26. Transformador de corriente en pedestal

### 3.4 Esquema de protección primaria y de respaldo

La protección encargada de proteger una zona en específico, llámese zona de protección del transformador, línea, barras, etcétera, recibe el nombre de protección primaria, así mismo, los esquemas de protección no son infalibles y por lo tanto todos los elementos de un SEP deben contar, además de la protección primaria, con una protección de respaldo.

**Protección primaria:** Se considera la primera línea de defensa, la protección primaria actuará de forma instantánea al presentarse una falla, operando lo más rápido posible y desconectando la menor cantidad posible de elementos del sistema

**Protección de respaldo:** Se refiere a aquellos esquemas de relevadores que se emplean cuando la protección primaria falla, por lo que es indispensable proveer un esquema alternativo que garantice la desconexión de la falla.

La protección primaria puede fallar debido a problemas en cualquiera de los siguientes elementos:

- 1.- Suministro de corriente o voltaje a los relevadores
- 2.- Voltaje de alimentación en corriente directa al circuito de disparo
- 3.- Relevadores de protección

El traslape de las zonas se logra con los transformadores de corriente (TC) como se ve en los siguientes casos:



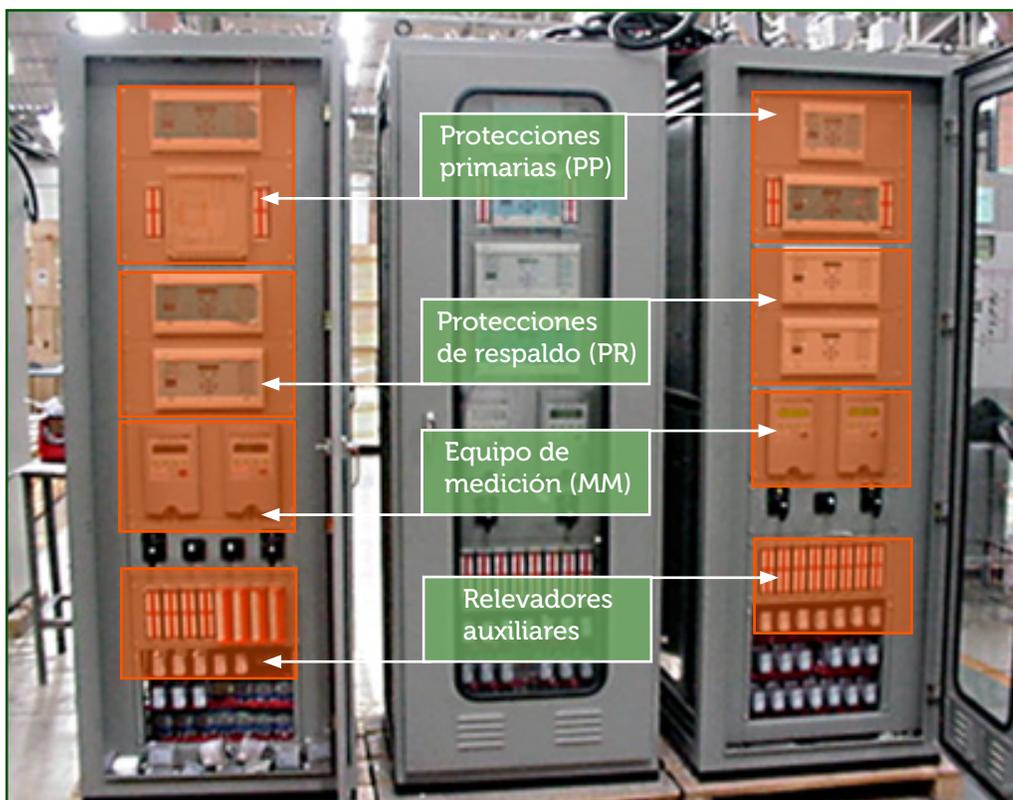


Figura 26. Tableros de protecciones para líneas de subtransmisión 115kV

Los esquemas de protección de respaldo, generalmente, operan más lentamente y desconectan más elementos que el esquema de protección primario. Los esquemas de respaldo se pueden conectar localmente (en la misma subestación), o remotamente. Con respaldos remotos, el esquema tiene independencia de los relevadores, transductores, baterías, etcétera, del esquema primario al que están respaldando. Sin embargo dependiendo de la complejidad del sistema, puede ser que el respaldo no vea todas las fallas contra las que se desea respaldar; adicionalmente la operación de respaldos remotos puede desconectar más fuentes del sistema de las permisibles.

Los respaldos locales no tienen estas deficiencias, pero comparten equipos con el esquema primario, cuya falla puede también afectar la operación del esquema de respaldo.

Por lo anterior, la protección de respaldo se puede definir de dos formas:

### Respaldo local

Consiste en el esquema de relevadores de protección que son independientes al esquema de protección primaria y que están conectados localmente (en la misma subestación), de tal forma que en caso de que el interruptor principal de la zona no opere, el esquema de respaldo libere la falla por medio de otros interruptores asociados a la subestación.

## Respaldo remoto

Consiste en proporcionar elementos de protección desde una subestación alejada (subestaciones colaterales), de tal forma que corte la alimentación al elemento fallado; por ejemplo: Si la protección de una barra en una subestación no opera ante una falla, ésta debe ser despejada desde todas las subestaciones que están conectadas con ella.

Para lograr este fin, se cuenta con la transmisión y recepción de señales de disparo entre relevadores localizados en los extremos de las líneas mediante los canales de comunicación: fibra óptica, OPLAT y microondas.

### 3.5 Requerimientos para la aplicación de los esquemas de protección

Una de las mayores dificultades de la aplicación de relevadores tiene que ver con un informe exacto de los requerimientos de la protección; Sin embargo, con la participación de ingenieros de campo, supervisores, consultores, fabricantes, entre otros, se proporciona información y datos suficientes que conllevan a la solución del problema, entre los cuales se citan los siguientes:

1. Configuración del sistema eléctrico
2. Conexión e impedancias del equipo primario
3. Voltaje del sistema
4. Secuencia de fases del sistema eléctrico
5. Procedimientos y pruebas preoperativas y de puesta en servicio
6. Tipo de equipo a proteger
7. Estudio de corto circuito (presente y futuro a 5 años)
8. Cargas máximas y estudios de oscilación
9. Localización, conexión y relación de TC y TP
10. Futuras ampliaciones
11. Aplicación de Especificaciones vigentes de CFE
12. Contrato del proyecto
13. Listado de relevadores de LAPEM aprobado

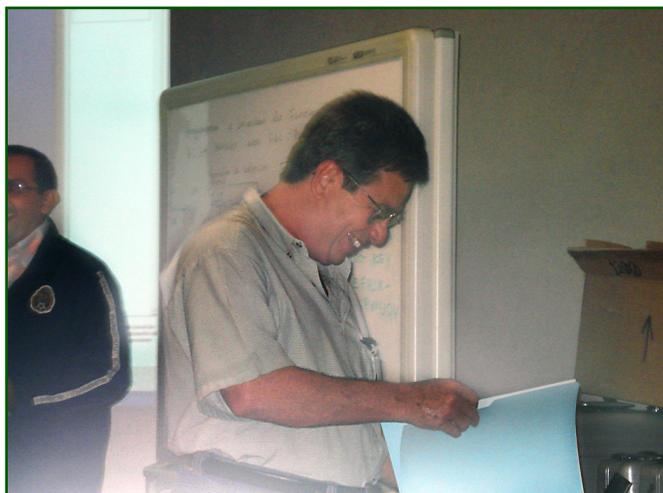


Figura 27. Ingeniero de Protecciones CFE, colaborando con información para la solución de problemas



### 3.6 Conexiones típicas de circuitos de protección

En los sistemas de protección es muy importante la interpretación adecuada de los diagramas esquemáticos y conexiones de equipos de PCYM. En la siguiente figura, te mostramos un diagrama típico de una línea y un bus en donde se incluye un esquema básico del circuito de CA para las señales de corriente y voltaje hacia el relevador, así como un esquema básico de CD utilizado para el circuito de disparo del interruptor.

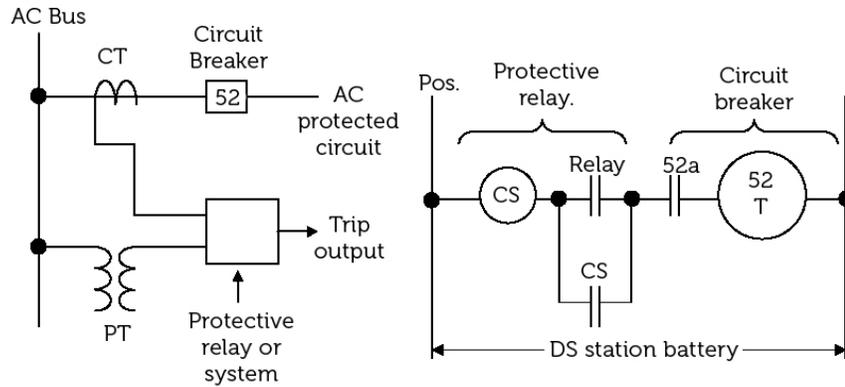


Figura 28. Conexión típica de un relevador de protección en una línea de CA y circuito de CD

Las señales de corriente que necesita el relevador, provienen siempre de los TC que están asociados al interruptor que se encuentra dentro de la zona protegida por dicho relevador o en función de los traslapes de corriente de TC que se utilizan de acuerdo a la filosofía de protecciones que ya hemos estudiado. En el caso de las señales de voltaje de los TP (transformador de potencial) para el relevador, se pueden utilizar las señales de los TP ubicados en el bus principal de la subestación o de los TP ubicados en la línea según sea el caso.

## Obras de consulta

Enriquez Harper, G. (2005). Fundamentos de instalaciones eléctricas de mediana y alta tensión. México: Limusa.

División de Educación Continua y a Distancia  
Facultad de Ingeniería

...: Jefatura de la División

Mtro. Víctor Manuel Rivera Romay  
E-mail: victor.rivera@mineria.unam.mx

...: Secretaría Académica

Lic. Anabell Branch Ramos  
E-mail: anabell.branch@mineria.unam.mx

...: Coordinación de Contenidos Académicos

...: Gestión de Proyecto

Lic. Julieta Xiqui Pérez  
E-mail: jxiqui@mineria.unam.mx

...: Diseño Instruccional

Lic. Sócrates Esteves Austria  
E-mail: socrates.esteves@mineria.unam.mx

...: Diseño Gráfico

Lic. Antonio Gómez Fuentes  
E-mail: antonio.gomez@mineria.unam.mx

...: Programación de Plataforma

...: Subdirección de Proyectos y Construcción

Ing. Benjamín Granados Domínguez  
E-mail: benjamin.granados@cfе.gob.mx

...: Coordinación de Proyectos de

Transmisión y Transformación  
Ing. César Fuentes Estrada  
E-mail: cesar.fuentes@cfе.gob.mx

...: Coordinador de Esc. Sup. De Obra

Ing. Elder Ruiz Mendoza  
E-mail: elder.ruiz@cfе.gob.mx

...: Desarrollo de Contenidos y Tutores

Ing. Juan G. Rivera Rosales

juan.rivera@cfе.gob.mx

Ing. Carlos Vela Meza

carlos.vela@cfе.gob.mx

Ing. Samuel Arturo Mendoza

samuel.mendoza@cfе.gob.mx

Ing. Gerardo Pérez Ramírez

gerardo.perez@cfе.gob.mx

Ing. Miguel Pérez Rivas

miguel.perez12@cfе.gob.mx

Ing. Porfirio Estévez Pérez

porfirio.estevez@cfе.gob.mx

