

ELC-30514  
Sistemas de Potencia I

---

# Anormalidades en Sistemas de Potencia

Prof. Francisco M. Gonzalez-Longatt

[fglongatt@ieee.org](mailto:fglongatt@ieee.org)

<http://www.giaelec.org/fglongatt/SP.htm>

# 1. Introduction (1/5)

---

- La *planificación, diseño y operación* de un sistema de potencia requiere un continuo y comprensivo *análisis* para evaluar el rendimiento actual y establecer *planes efectivos de expansión y mejora*.
- El trabajo computacional para determinar los flujos de potencia (*power flows*) y niveles de voltaje (*voltage levels*) resultantes de una condición sencilla de operación para aunque una pequeña red es del todo intolerable, si se realiza por métodos manuales.

# 1. Introduction (2/5)

---

- La necesidad de ayuda computacional dio origen al diseño de una *computadora de analógica* de propósito especial (analizador de red de ac; *ac network analyzer*) a comienzos de 1929.
- Este provee la *posibilidad de determinar los flujos de carga y voltajes* durante condiciones *normales y de emergencia* y estudiar el *comportamiento transitorio* del sistema resultante de una condición de falla o de conmutación.

# 1. Introduction (3/5)

---

- Hoy, las *computadoras digitales* son una herramienta imprescindible en la planificación de sistemas de potencia, en el cual es necesario predecir el crecimiento futuro y simular día a día la operación por períodos superiores a los veinte años y más.
- Tal como la tecnología de la computación ha avanzado, también la *complejidad en los sistemas de potencia industrial y comercial* ha ocurrido lo mismo.
- Estos sistemas de potencia han crecido en las décadas recientes con capacidades que *exceden al de las pequeñas empresas de distribución de electricidad*.

# 1. Introduction (4/5)

---

- Hoy, el intensamente *competitivo ambiente de negocios* ha forzado a las plantas o personal de la gerencia de las empresas eléctricas a ser muy cuidadoso del *costo total directo de distribución de electricidad*.
- Entonces ellos deben asegurar el *máximo retorno del capital de inversión* en el sistema de potencia.

# 1. Introduction (5/5)

---

- El uso de computadoras digitales hace posible *estudiar el rendimiento de sistemas de potencias actuales y propuestas* bajo muy variadas condiciones de operación.
- Respuestas a *múltiples preguntas sobre el impacto de expansiones* en el sistema, capacidad de cortocircuito, estabilidad de distribución de carga, etc. pueden ser *inteligentemente y económicamente obtenidas*.

ELC-30514  
Sistemas de Potencia I

---

# Estudios Aplicados a Sistemas de Potencia

Flujo de Potencia, Cortocircuito,  
Estabilidad, Arranque de Motores,  
Armónicos

## 2. Aplicaciones en SP (1/7)

---

- La planificación, diseño y operación de los sistemas de potencia requiere de *estudios de ingeniería para evaluar el rendimiento* del sistema existente, confiabilidad, seguridad y economía.
- Los estudios, propiamente concebidos y conducidos, son *una vía de costo efectivo, para prevenir sorpresas y optimizar la selección de equipos*.

## 2. Aplicaciones en SP (2/7)

---

- En la etapa de diseño, los estudios identifican y *alertan potenciales deficiencias* en el sistema antes que este entre en operación.
- En sistemas existentes, ayudan a *localizar la causa de falla de equipos y mala operación*, y determina *medidas correctivas* para mejorar el rendimiento del sistema.

## 2. Aplicaciones en SP (3/7)

---

- La complejidad de los modernos sistemas de potencia, hacen el *estudio por medios manuales difíciles, tediosos y de un consumo alto de tiempo*.
- Las herramientas computacionales asociados con los estudios de sistemas de potencia han sido *grandemente simplificados por el uso de programas de computadoras digitales*.
- Algunas veces, requerimientos de estudios y economía *obligan al uso de computadoras analógicas* –un analizador de transitorios de redes (*transient network analyzer TNA*)- el cual provee un modelo a escala del sistema de potencia.

## 2. Aplicaciones en SP (4/7)

---

- Los programas digitales ofrecen a los ingenieros una *poderosa herramienta para realizar estudios de rendimientos del sistema eficientemente.*
- Las computadoras permiten *diseños óptimos a mínimos costos, independientemente de la complejidad del sistema.*
- Los avances en la tecnología de computación, han no solo *reducido los costos de cómputo* sino también *el tiempo de ingeniería* necesario para el uso de los programas.

## 2. Aplicaciones en SP (5/7)

---

- Los estudios formales ya pueden ser hechos *fuera de las consultoras* siendo posible ser hechos en casa.
- Los programas altamente amigables al usuario, con menús interactivos, ayudas en línea e interfaces gráficas de usuario (*GUI Graphical user interface*) guía a los ingenieros a través del programa para emprender los análisis.

## 2. Aplicaciones en SP (6/7)

---

- El *Transient network analyser* (TNA) es una poderosa herramienta para los estudios de sobretensiones.
- El uso de microcomputadores para el control y adquisición de datos desde el TNA permitiendo la incorporación de probabilidad y estadística en el análisis de sobretensiones de maniobra (*switching surge*).
- Una de las mayores ventajas del TNA, es que permite una fácil y rápida reconfiguración de sistemas complejos con un resultado inmediato, evitando el relativamente alto tiempo asociado con el ejecutarse de programas digitales para esos sistemas.

## 2. Aplicaciones en SP (7/7)

---

- Los más comunes estudios en sistemas de potencia son:
  - Estudios de Flujo de Potencia (*Load Flow Studies*)
  - Estudios de Cortocircuitos (*Short-circuit studies*)
  - Estudios de Estabilidad (*Stability studies*)
  - Estudios de arranque de motores (*Motor-starting studies*)
  - Estudios de armónicos (*Harmonic analysis studies*)

## 2.1 Estudios de Flujo de Potencia

---

- El estudio de flujo de carga, *determina el voltaje, corriente, potencia activa y reactiva además del factor de potencia*, en un sistema de potencia.
- Los estudios de flujo de carga son una *excelente herramienta para la planificación del sistema*.
- Un número de *procedimientos de operación*, pueden ser analizados, incluyendo condiciones de contingencias, tales como la pérdida de un generador, una línea de transmisión, o una carga.
- Estos estudios alertaran al usuario sobre las *condiciones que pueden causar sobrecarga de los equipos o pobres niveles de voltaje*.

## 2.1 Estudios de Flujo de Potencia

---

- Los estudios de flujo de carga pueden ser usados para *determinar el tamaño y localización óptima para capacitores de potencia para mejora de factor de potencia.*
- También, son muy usuales en la *determinación de los voltajes del sistema bajo condiciones de repentinas aplicaciones o desconexiones de carga.*
- Los resultados de un estudio de flujo de carga son también *punto de partida de estudios de estabilidad.*
- Las *computadoras digitales son usadas ampliamente en los estudios de flujo de carga debido a la complejidad de los cálculos involucrados.*

## 2.2. Estudio de Cortocircuito

---

- Los estudios de cortocircuito son hechos para *determinar la magnitud de las corrientes que fluyen a través del sistema de potencia a varios intervalos de tiempo luego que una falla ocurre.*
- La magnitud de las corrientes que fluyen a través del sistema de potencia luego de una falla *varía con el tiempo a menos que alcancen la condición de régimen permanente.*
- Este comportamiento es debido a las *características del sistema y dinámica.*

## 2.2. Estudio de Cortocircuito

---

- Durante este tiempo, los sistemas de protección son llamados a detectar, interrumpir e aislar esa falla.
- Los esfuerzos impuestos en estos equipos dependen también de la magnitud de la corriente, la cual dependen del tiempo de la inserción de la falla.
- Esto es hecho para varios tipos de falla (trifásica, fase a fase, doble fase a tierra y fase a tierra) a diferentes localizaciones a través del sistema.
- La información es usada para seleccionar fusibles, *breakers*, y *swichgear* en adición con los ajustes de los dispositivos de protección.

## 2.3. Estudios de Estabilidad

---

- La habilidad de un sistema de potencia, que contiene dos o más máquinas sincrónicas, de *continuar operando luego que un cambio ocurre en el sistema es una medida de su estabilidad.*
- El problema de estabilidad toma dos formas: *estabilidad de régimen permanente y estabilidad transitoria.*
- La *estabilidad de régimen permanente* puede ser definida como la habilidad del sistema de potencia de mantener sincronismo entre las máquinas dentro del sistema luego de una *relativamente lento cambio de carga.*

## 2.3. Estudios de Estabilidad

---

- La *estabilidad transitoria* es la habilidad del sistema de mantener en sincronismo bajo *condiciones transitorias*, tales como fallas, operaciones de maniobra, etc.
- En un sistema industrial de potencia, la estabilidad puede envolver el sistema de la empresa eléctrica y uno o más generadores dentro de la empresa o motores sincrónicos.

## 2.3. Estudios de Estabilidad

---

- Las contingencias, tales como botes de *carga* (*load rejection*), poseen un impacto directo sobre la estabilidad.
- Los esquemas de aislar (*Load-shedding*) cargas y el tiempo total de despeje de falla (*critical fault-clearing times*) pueden ser determinados en función de seleccionar los apropiados ajustes de los relés de protección.

## 2.3. Estudios de Estabilidad

---

- Este tipo de estudios son probablemente el *más complejo* de los hechos en un sistema de potencia.
- Una *simulación* debe incluir modelos de los generadores sincrónicos y sus controles, por ejemplo: reguladores de voltaje, sistemas de excitación, y gobernadores.
- Los motores son algunas veces representados por sus *características dinámicas* como son los compensadores estáticos y relés de protección.

## 2.4. Estudios de Arranque de Motores

---

- La corriente de arranque de la mayoría de los motores AC son *varias veces la corriente normal de plena carga*.
- Tanto los motores sincrónicos como los de inducción pueden maneja entre 5 y 10 veces la corriente a plena carga cuando arrancan desde la línea de alimentación.
- El *torque de arranque varía directamente con el cuadrado del voltaje aplicado*.

## 2.4. Estudios de Arranque de Motores

---

- Si el *voltaje en terminales cae en forma excesiva*, el motor puede *no tener suficiente toque como para acelerar y alcanzar la velocidad de operación*.
- Los motores funcionando pueden aparecer por una excesiva caída de voltaje, o por la *operación de los relés de bajo voltaje*.
- Si los motores son arrancados frecuentemente, la variación del voltaje puede causar *flicker* apreciables en los sistemas de iluminación.

## 2.4. Estudios de Arranque de Motores

---

- Con el uso de las técnicas de estudios en el arranque de motores, estos *problemas pueden ser precedidos antes de la instalación del motor.*
- Si un dispositivo de arranque es necesario, su característica y ajuste puede ser fácilmente determinado.
- Una típica computadora digital puede *calcular la velocidad, deslizamiento, toque eléctrico de salida, corriente de carga, y voltaje en terminales* en intervalos de tiempo discretos desde la velocidad de rotor bloqueado hasta la de plena carga.

## 2.4. Estudios de Arranque de Motores

---

- También, el voltaje en importantes puntos a través del *sistema durante arranque puede ser monitoreado.*
- El estudio ayuda a seleccionar el *mejor método de arranque, el diseño apropiado del motor, y los requerimientos de diseño del sistema para minimizar el impacto del arranque* del motor en el sistema entero.

## 2.5. Estudios de Armónicos

---

- Un *armónico producido por una carga puede afectar a las otras cargas* si una distorsión significativa de voltaje es causada.
- La distorsión de voltaje causada por una carga productora de armónicos es una función, tanto de la impedancia del sistema como del valor del armónico de corriente inyectado.
- El hecho real es que para *una corriente de carga dada está distorsionada, no siempre significa que generara efectos adversos a los otros consumidores.*

## 2.5. Estudios de Armónicos

---

- Si la impedancia del sistema es baja, la distorsión de voltaje es usualmente despreciable en la ausencia de resonancia armónica.
- *Si la resonancia armónica prevalece, voltajes y corrientes armónicas son intolerables.*
- Algunos de los efectos primarios de la distorsión de voltaje son los siguientes:
  - Interferencia de sistemas de control y comunicaciones.
  - Calentamiento en máquinas rotatorias.
  - Sobrecalentamiento y falla de capacitores
- Cuando las corrientes armónicas son altas y viajan en una parte significativa expuesta a circuito paralelos de comunicación, el efecto principal es la *interferencia telefónica*.

## 2.5. Estudios de Armónicos

---

- Este *problema depende de las partes físicas del circuito* como también de la *frecuencia y magnitud* de las corrientes armónicas.
- Las corrientes armónicas también causan *pérdidas adicionales en la línea y adicionales perdidas por histéresis en los transformadores*.

## 2.5. Estudios de Armónicos

---

- *Errores en las mediciones de energía* son frecuentemente causadas por armónicos.
- A una frecuencia armónica, el medidor puede *registrar un valor más alto o más bajo dependiendo de los armónicos presentes y de la respuesta del medidor a ese armónico.*
- Afortunadamente *el error es usualmente bajo.*

## 2.5. Estudios de Armónicos

---

- Los análisis son comúnmente hechos para *predecir los niveles de distorsión* en adición de una nueva carga generadora de armónicos o un banco de capacitores.
- El procedimiento es primero *desarrollar un modelo que pueda precisamente simular* la respuesta armónica de el sistema actual y entonces se agrega el modelo de la nueva adición.
- El análisis también comúnmente hecho *evalúa alternativas para corregir los problemas encontrados por mediciones*.

## 2.5. Estudios de Armónicos

---

- *Solo pequeños circuitos pueden ser analizados sin un programa computacional.*
- Típicamente, un programa computacional, para el análisis de armónicos, proveerá al ingeniero de la capacidad para calcular la respuesta en frecuencia del sistema de potencia y mostrará su respuesta en forma gráfica.
- Los programas proveen la capacidad de *predecir la distorsión real basado de modelos* de convertidores, hornos de arco y otras cargas no lineales.

# Análisis de Sistemas de Potencia

## Clasificación

### 3. Clasificación Clásica del Análisis

---

- Una concepción clásica del análisis de sistemas eléctricos de gran potencia, se basa en el estudio de la red bajo dos condiciones temporales posibles,
  - *Régimen permanente y*
  - *Régimen dinámico.*

### 3. Clasificación Clásica del Análisis

---

- En el estudio en condiciones de régimen permanente se remite solamente problemas donde se ameritan la resolución de *ecuaciones algebraicas*.
- Los problemas de régimen dinámico determinar alguna variable implica la resolución de *ecuaciones diferenciales* en el plano temporal, lo cual hace la mayor parte de las veces que los estudios dinámicos de sistema de potencia se transformen en **materia de postgrado**.

### 3. Clasificación Clásica del Análisis

---

- Los grandes y complejos sistemas eléctricos de potencia requieren el planteamiento y resolución de un *gran número de ecuaciones ya sean algebraicas o diferenciales*, por esto, en ocasiones este laborioso trabajo es realizado por computadores digitales.
- Un *sistema de potencia se considera simétrico*, siendo la línea de transmisión el único elemento que provee asimetría, pero si se supone que la línea es transpuesta o es de una longitud muy corta, se logra despreciar o eliminar los efectos asimétricos y se estudia como balanceada.

### 3. Clasificación Clásica del Análisis

---

- En condiciones asimétricas el estudio del comportamiento del sistema *requiere un tratamiento especial, sobre la base de la teoría de componentes simétricas*.
- Las condiciones de desbalances del sistema no solo lo imponen las cargas sino que también las fallas.

# Causas de Anormalidades en Sistemas de Potencia

## 4. Causas del Funcionamiento Anormal

---

- En sistema de potencia puede ser afectado por *muchas situaciones anormales* que produzcan una operación fuera de las condiciones normales, estas posibles causas pueden ser:
  - Falla de los componentes del sistema
  - Situaciones de carácter imprevisto (Por ejemplo: Tormentas, etc.)
  - Errores de operación. (Manuales o automáticos)
- Estas situaciones provocan efectos muy variados en el sistema de potencia tales como:
  - Mal servicio.
  - Pérdida de la estabilidad.
  - Daños de los equipos.

## 4. Causas del Funcionamiento Anormal

---

- Las grandes compañías eléctricas son las encargadas de desempeñar las funciones de los grandes sistemas de potencia, siendo *importante para ellas eliminar las situaciones anormales de operación*.
- Las interrupciones del servicio, y la variación de los parámetros de la red (tensión, corriente, frecuencia, etc.) fuera de los límites, son consecuencia común de una operación anormal, causando enormes *inconvenientes técnicos y económicos*.

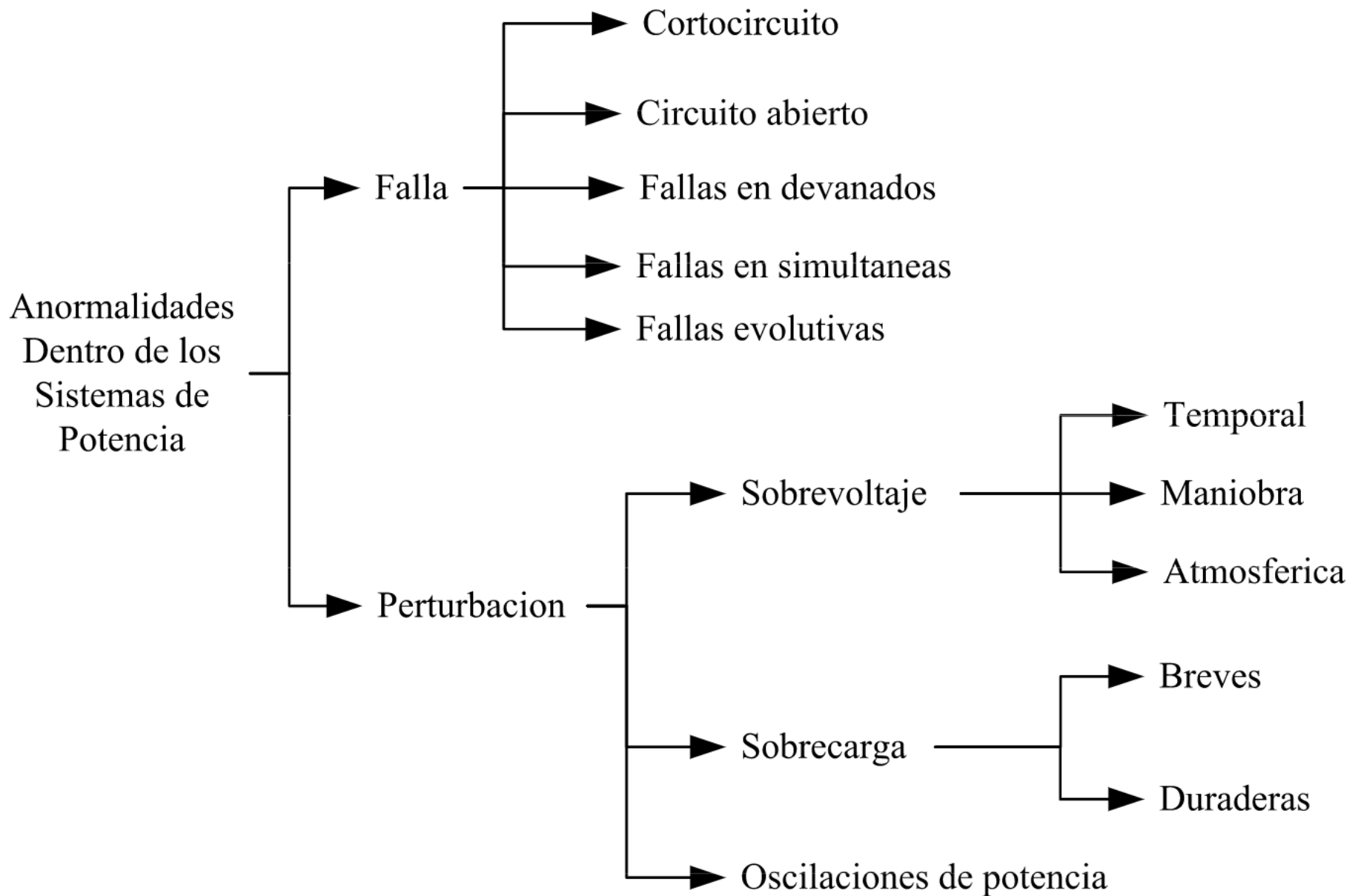
# Anormalidades en Sistemas de Potencia

- Perturbaciones y Fallas -

## 5. Anormalidades dentro de un SP

---

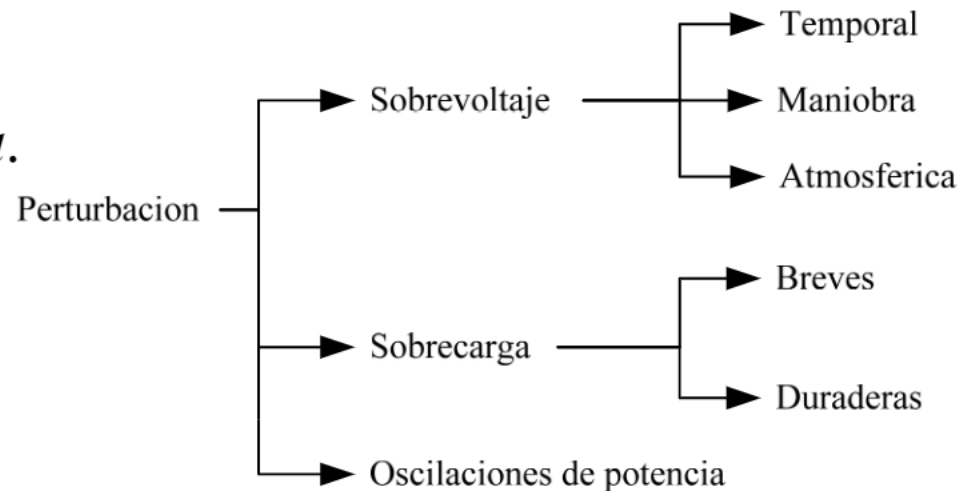
- Una clasificación sencilla de las anormalidades de acuerdo a su severidad con que afectan al sistema de potencia es:
  - *Perturbaciones.*
  - *Fallas.*



## 5.1. Perturbaciones

---

- Las perturbaciones son *condiciones que permiten continuar la operación de un sistema pero que pueden ocasionar el daño de ciertos equipos si su duración es prolongada.*
- Las perturbaciones pueden ser causadas por:
  - *Sobretensiones.*
  - *Sobrecarga.*
  - *Oscilaciones de potencia.*



## 5.1.1. Sobretensiones

---

- Las **sobretensiones** son cualquier *valor de tensión entre fase y tierra, cuyo valor pico, es mayor que la tensión máxima del sistema.*
- La tensión en el sistema eléctrico de potencia es variable, dependiendo de las condiciones del sistema, estas variaciones están limitadas por las características de los equipos, tensión nominal, tensión máxima.
  - *Voltaje Nominal:* Es el valor de la tensión para el cual se proyectó el sistema y se fabricó y probaron los equipos. Ejemplo: En Venezuela el sistema de proyecto para las siguientes voltajes nominales: 115, 230, 400 y 765 kV.
  - *Voltaje Máxima:* comprende un aumento de 5% a 10% por encima de la tensión nominal del sistema. Ejemplo: En Venezuela las máximas tensiones de operación son respectivamente: 115/123; 230/242; 400/440; 765/800 kV.

## 5.1.1.1. Sobretensiones Temporal

---

- Una **sobretensión temporal** es una *tensión oscilatoria en fases o entre fases y tierra de larga duración no amortiguadas o en su defecto ligeramente amortiguado*.
- Las sobretensiones temporales consisten en cambios en la amplitud de la componente de 60Hz de la tensión o sus armónicas por efecto de operaciones de maniobra, cambios den el flujo de potencia reactiva, fallas o bien por *Ferroresonancia*.

## 5.1.1.1. Sobretensiones Temporal

---

- La sobretensión, si es superior al 20% de la tensión nominal y de acuerdo a la ubicación del codo de la curva de magnetización de los transformadores puede ocasionar una fuerte saturación del núcleo magnético, vibraciones en el núcleo, etc., además se genera corrientes armónicas que pueden producir resonancia en el sistema dando origen a sobretensiones adicionales.
- Los orígenes de las sobretensiones temporales pueden ser:
  - *Energización de líneas (Efecto Ferranti).*
  - *Cambios bruscos de carga*
  - *Sobretensiones por falla: Ferroresonancia*
  - *Conductores en abierto.*

## 5.1.1.2. Sobretensiones de Maniobra

---

- Las **sobretensiones de maniobra** son tensiones transitorias que se producen por cambios bruscos en el sistema, son de corta duración (mili-microsegundos) y que son altamente amortiguadas.
- Las posibles causas de sobretensiones de maniobra son:
  - Apertura de corrientes de falla,
  - Falla kilométrica (falla en una línea a una distancia de algunos kilómetros del interruptor),
  - Apertura de transformadores en vacío y reactores, Aperturas de circuitos capacitivos.

### 5.1.1.3. Sobretensiones de Atmosférica

---

- Las **sobretensiones atmosféricas** son *elevaciones de la tensión causadas por descargas eléctricas atmosféricas entre nube y tierra, que impactan en las instalaciones y líneas de transmisión*, estas sobretensiones son unidireccionales y de muy corta duración y su valor no depende de la tensión del sistema.

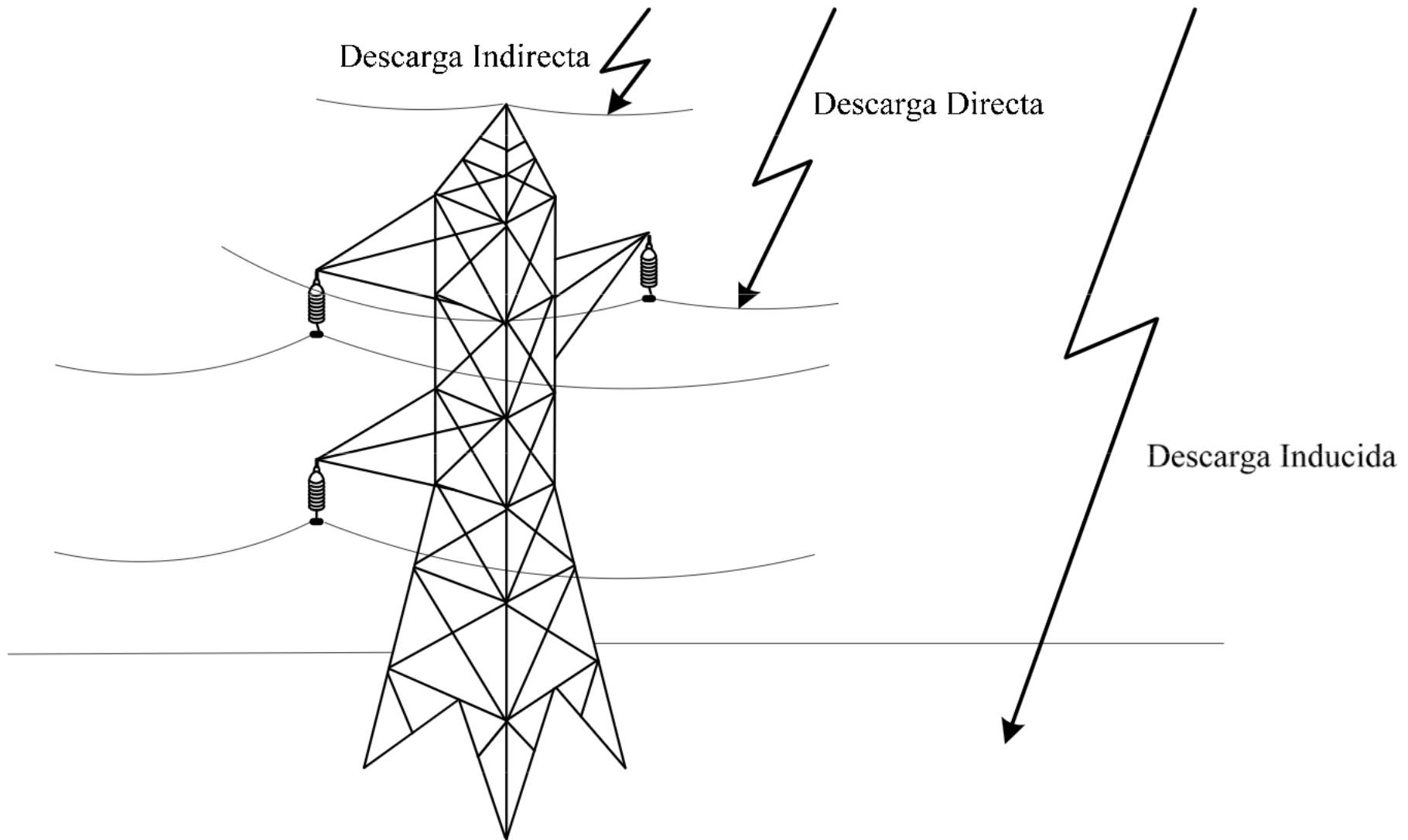
### 5.1.1.3. Sobretensiones de Atmosférica

---

- Las descargas pueden ser:
  - *Directas*: La descarga alcanza directamente alguno de los conductores de fase, es la más grave, debido a que la magnitud de estas sobretensiones son independientes de la tensión del sistema y por lo general sumamente elevadas.
  - *Indirectas*: Cuando la descarga se produce sobre los cables de guarda, las torres o a los elementos de apantallamiento o blindaje.
  - *Inducidas*: Corresponde cuando la descarga tiene lugar en las cercanías de la líneas o instalaciones.

### 5.1.1.3. Sobretensiones de Atmosférica

---



## 5.1.2. Sobrecargas

---

- Se dice que un equipo esta en sobre cargado cuando la corriente es mayor que el valor de la corriente nominal. De acuerdo a la duración de las sobrecargas estas son clasificadas en: Sobrecargas *Breves* y *Duraderas*.
- Una sobre carga puede ser causada por una gran diversidad de situaciones, pero las más comunes son:
  - Cortocircuitos no aislados oportunamente.
  - Excesos de carga, ya sea por picos de cargas posibles o desconexión de circuitos paralelos.
  - Es importante tener presente que la sobrecarga por lo general viene acompañado de efectos térmicos, propios del efecto Joule.

### 5.1.3. Oscilaciones de Potencia

---

- Las oscilaciones de potencia son causadas comúnmente por la *conexión y desconexión de circuitos del sistema eléctrico cuando se producen variaciones de potencia*.
- Esto es debido a que los generadores no toman instantáneamente el ángulo de la impedancia de la carga, sino después de varias oscilaciones amortiguadas, pudiéndose inclusive perder el sincronismo, esto se traduce en una sobrecarga ya que las corrientes generadas son de diferente frecuencia a la frecuencia industrial.

### 5.1.3. Oscilaciones de Potencia

---

- Las oscilaciones de potencia son especialmente graves para los generadores y turbinas, existen unos ciertos equipos específicos que tratan de controlar las oscilaciones de potencia, estos son los denominados gobernadores o reguladores de velocidad.

## 5.2. Falla

---

- Una falla es una condición que *impide la operación de uno o más equipos de un sistema y que permitiera de la rápida intervención de los sistemas de protección para evitar el daño de los equipos.*
- Una falla eléctrica implica dos posibles estados, una falta de aislación que se traduce en un cortocircuito, o una falta de continuidad eléctrica que implica un circuito abierto.
-

## 5.2. Falla

---

- Según *CADAFE*, la definición arbitraria de falla es:

*Se considera una falla a aquel evento que:*

- *Produzca la apertura de un interruptor (automáticamente).*
- *Error de operación de un interruptor o seccionador.*
- *Cualquier interrupción del servicio no planificado.*

## 5.2. Fallas

---

- Los tipos de fallas eléctricas en un sistema de potencia son:
  - Cortocircuitos.
  - Circuitos Abiertos.
  - Fallas simultáneas.
  - Fallas en devanados.
  - Fallas en evolución.

## 5.2.1. Cortocircuito

---

- Un concepto muy simple pero efectivo de cortocircuito, es el que lo define como *el fenómeno eléctrico que ocurre cuando dos puntos entre los cuales existe una diferencia de potencial se ponen en contacto entre sí, caracterizándose por la circulación de elevadas magnitudes de corriente hasta el punto de falla.*
- Según Martí, J. (1975) *Un cortocircuito se produce en un sistema eléctrico cuando entra en contacto entre si o con tierra, conductores energizados correspondientes a distintas fases.*
- La enciclopedia del CEAC, agrupa bajo el nombre de cortocircuito *a todos los defectos provocados por un contacto, bien entre conductor y tierra o cualquier pieza metálica unida a ella o bien entre conductores.*

## 5.2.1. Cortocircuito

---

- En palabras de este autor, un cortocircuito es el *fenómeno transitorio que tiene lugar cuando elementos de un sistema de potencia que poseen una diferencia de potencia entran en contacto entre sí, provocando una circulación de corriente varias veces mayor a la corriente nominal.*
- La única impedancia que limita la corriente en un cortocircuito es la impedancia vista desde la fuente de generación y el punto de falla.
- La magnitud de la corriente de cortocircuito es grande, por lo general, es de 5 a 20 veces la capacidad nominal del sistema.
- En un cortocircuito un simple, el valor de la corriente, depende del número de generadores conectados y la configuración de la red además del momento en que ocurre la falla, y el tipo de falla; incluyendo otros factores.

## 5.2.1. Clasificación de los Cortocircuitos

---

- Los cortocircuitos pueden ser clasificados de acuerdo a la *forma que se efectúa el contacto entre sí o con tierra* los conductores energizados, a saber:
- *Cortocircuito por contacto directo*: Es aquel que surge por el contacto directo entre los conductores de fases distintas o de fases con tierra. *Ejemplo*. Cuando los conductores de una línea de transmisión de fases distintas entren en contacto por balanceo de los mismos ocasionado por el viento.
- *Cortocircuito por ruptura de aislamiento*: Es el cortocircuito que se produce como consecuencia de un arco eléctrico que atraviesa el medio aislante. Un arco eléctrico es generado en cualquier medio, cuando el gradiente de potencial supera la rigidez dieléctrica del medio, provocando la creación de un camino de baja resistencia por donde fluye la corriente por el medio. (la ruptura dieléctrica se genera por sendas diferencias de potencial por lo general producto de sobretensiones).

## 5.2.1. Origen de los Cortocircuitos

---

- Los cortocircuitos pueden ser consecuencias de una multitud de fenómenos, entre los cuales se encuentran:
  - Origen Eléctrico.
  - Origen Mecánico.
  - Origen Fortuito
- *Origen Eléctrico:* Se considera que un cortocircuito tiene causa eléctrica, cuando el mismo es producto de la modificación extrema de los parámetros eléctricos de los elementos del sistema, ya sea por causa interna o externa. Este tipo de causa, resultan de la incapacidad de los elementos de soportar la tensión o condiciones eléctricas del sistema.
- Dentro de las causas eléctricas se encuentran:
  - *Sobretensiones Atmosféricas.* son causados por el rayo que alcanza los conductores de una línea, bien sea por tempestad, la niebla o el hielo. La caída directa de un rayo en una torre, si la resistencia de puesta a tierra tiene un valor excesivo, puede resultar un potencial a tierra suficientemente alto para que simultáneamente se produzca el cebado de las fases (*descarga de retroceso*) resultando en un cortocircuito trifásico en ocasiones.
  - *Sobretensiones de Maniobra.*
  - *Contaminación de los aisladores o envejecimiento del aislamiento.* Cuando las condiciones de un material aislante,
- *Origen Mecánico:* Las causas mecánicas de un cortocircuito engloba todos los eventos que pueden producir el contacto entre las fases o fases y tierra. Es común la rotura de cadena de aisladores, la caída de un cuerpo extraño tal como la rama de un árbol sobre una línea aérea, un golpe de excavadora en un cable subterráneo, la destrucción de una torre, la caída de un avión o helicóptero sobre una línea.
- *Origen Fortuito:* En esta categoría entran todas las causas que no pueden ser incluidas en las de tipo eléctrico y mecánico. En esta entran los cortocircuitos debido a falsa maniobras, la apertura de un seccionador bajo carga, etc.

## 5.2.1. Tipos de Cortocircuitos

---

- Pueden ocurrir diferentes tipos de fallas por cortocircuito.
- De acuerdo a la forma en que el evento tenga lugar, es decir, según el número de fases afectadas o que intervienen en él, dividiéndose:
- *Cortocircuito Trifásico*: Se origina cuando los tres conductores de fases entren en contacto entre sí.
- *Cortocircuito Bifásico a Tierra*: Tiene lugar cuando los conductores de dos fases distintas hacen contacto entre si y tierra.
- *Cortocircuito Línea a Tierra*: Este cortocircuito es el más común, provocado cuando un conductor de fase energizado toca tierra.
- *Cortocircuito Trifásico a Tierra*: La ocurrencia de este cortocircuito es remota pero posible, consiste en que los conductores de las tres fases energizados realicen un contacto con tierra.

## 5.2.1. Consecuencia de un Cortocircuito

---

- Las consecuencias de un cortocircuito son muy variables y depende de un gran número de variables, pero por lo general depende de tres factores básicamente:
  - Ubicación del sitio afectado.
  - Potencia asociada al cortocircuito.
  - Duración del cortocircuito.
- Tomando en cuenta los factores antes expuestos, a continuación se presentan algunos de los efectos más comunes y sus causas.
  - *Destrucción física del lugar del cortocircuito:* Esto se debe a la gran cantidad de energía disipada por el arco eléctrico en el momento de la falla.
  - *Solicitud Dinámica, o esfuerzos mecánicos:* Las tremendas intensidades de corrientes que circulan en el momento de un cortocircuito inducen grandes campos magnéticos que interactúan provocando fuerzas que producen esfuerzos mecánicos severos. Ejemplo: En situación de cortocircuito es común encontrar barras y núcleos de transformadores deformados.
  - *Solicitud Térmica:* La circulación de la corriente de cortocircuito provoca una gran disipación térmica como consecuencia del efecto Joule.
  - *Interrupción del suministro de energía:* La disminución de la tensión del sistema como consecuencia del cortocircuito, provoca que los sistemas de protección para proteger la integridad del sistema, despeje o desconecte el circuito fallado.

## 5.2.1. Consecuencia de un Cortocircuito

---

- *Sobretensiones:* Como consecuencia de la asimetría producida por el cortocircuito las fases sanas elevan su tensión por encima del valor máximo del sistema, provocando una sobretensión. La superposición de tensiones, excitación de armónicos y subarmónicos, incrementan las tensiones en las fases sanas.
- *Oscilación Electromagnética en la Máquina Síncrona:* Debido a que las corrientes de cortocircuito alteran el equilibrio entre la potencia mecánica y eléctrica en la máquina.
- *Generación de par rotórico negativo. Carga del devanado de amortiguación del rotor.* Esto es producto de las asimetrías imperantes en las tensiones y las corrientes.
- *Alteración de la relación de transformación de los transformadores de medida:* Como consecuencia de la componente continua de la corriente de cortocircuito.
- *Incremento de la tensión de paso y toque:* Debido a la intensidad de corriente que circula por tierra durante la falla.
- *Perturbación inductiva en sistemas vecinos:* Estos es consecuencia del campo magnético asociado a la falla, es decir, a la corriente de cortocircuito respectiva.

## 5.2.2 Circuito Abierto

---

- Los conductores en circuito abierto, consisten en la falta de continuidad eléctrica de una o más fases del circuito. Las causas de los circuitos abiertos son muy variadas entre ellas se pueden mencionar: la operación incorrecta de un interruptor al abrir o cerrar, la ruptura de los puentes de amarre de una línea de transmisión, etc.
- La importancia del estudio de las condiciones de circuito abierto, es debido a la presencia de tensiones y corrientes desbalanceadas, constituyendo un gran riesgo de daño para las máquinas.

## 5.2.3. Fallas Simultaneas

---

- Las fallas simultáneas son combinaciones de dos o más fallas de ocurrencia al mismo tiempo. Las fallas pueden ser del mismo tipo o diferentes y ocurrir en el mismo punto o diferentes.
- Las fallas simultáneas pueden poseer causas en común o diferentes, y en casos como consecuencia de la primera. Es posible que las fallas sean consecuencias de eventos totalmente diferentes, pero esto es poco probable. *Ejemplo.* Las fallas de dos circuitos en una línea doble circuito por una causa en común. Estas dos fallas aunque son geográficamente coincidentes, son separadas eléctricamente.
- *Falla Campo traviesa (Cross-Country Earth-Fault):* consiste en una falla línea a tierra en un punto y en una fase coincidentes otra falla línea a tierra y en otra fase. Este tipo de falla ocurre con sistemas puestos a tierra por impedancias; la segunda falla ocurre por el aumento de tensión en las fases sanas, debido al desplazamiento del neutro producido por la primera falla.
- Una falla simultánea puede ser causada en una línea de transmisión aérea, por la ruptura de un conductor cercano a una torre que sostenga por el aislador de suspensión mientras que la otra parte cae a tierra produciendo una falla línea a tierra.

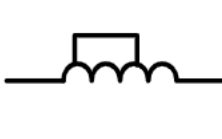
## 5.2.4. Fallas en Devanados

---

- Consiste básicamente a las situaciones en los devanados que provocan una operación anormal del sistema de potencia.

(a)  Falla de devanado a tierra

(b)  Falla entre devanados

(c)  Falla entre dos puntos en el mismo devanado.  
Cortocircuito entre espiras

(d)  Circuito abierto

- La falla de circuito abierto en devanados es de muy rara ocurrencia. *Ejemplo.* Un transformador con cambiador de tomas (tap) automático, por una mala operación puede provocar una falla en devanados.

## 5.2.5. Fallas Evolutivas

---

- Las fallas evolutivas son fallas que cambian durante el tiempo de permanencia u ocurrencia de las mismas, estas son causadas comúnmente por la propagación del arco o la difusión de gastos tensados a otras fases y eventualmente a otros circuitos.
- *Ejemplo.* Una falla línea a tierra evoluciona y se transforma en una falla doble línea a tierra y eventualmente evoluciona a una falla trifásica.
- El análisis de fallas evolutivas no presenta ningún inconveniente ya que una falla de este tipo puede estudiarse como una falla que cambia en el tiempo.

## 5.3. Importancia de la Corriente de Cortoc

---

- Estimar el valor de la corriente de falla por cortocircuito en un sistema de potencia es muy importante porque permite realizar en función de sus resultados una serie de mejoras y arreglos dentro del mismo para contrarrestar los efectos de la fallas, y entre otras cosas:
- La selección y coordinación de protecciones.
  - Determinar las capacidades de interrupción de los interruptores.
  - Determinar los esfuerzos dinámicos y térmicos en las instalaciones.
  - Determinar la capacidad de cortocircuito de una central o un sistema

## 5.4. Factores que afectan la Severidad de una Falla

---

- Las corrientes de cortocircuito o falla dependen de varios factores, pero en especial existen algunos que provocan un aumento del su valor, haciendo más severa la falla.
- Las *condiciones de las fuentes afectan una falla*, es necesario conocer cada uno de los generadores además de los extremos mínimos y máximos de generación.
- Es necesario contar la *configuración del sistema en servicio*, debido a que ciertas configuraciones hacen más severas las fallas que otros.
- *La situación de los neutros*, en el caso de una falla asimétrica que incluye tierra. La corriente que circula en cortocircuito se verá grandemente afectada por el número de neutros puestos a tierra y afectados por la manera de conexión de los neutros a tierra.
- *Ubicación y tipo de falla*, estos factores influyen en la magnitud y en la distribución de la corriente de falla.
- La falla trifásica (normalmente) es la más severa, pero en ciertas ocasiones y condiciones se estudia la falla línea a tierra porque en sistemas sólidamente aterrados en ocasiones la corriente de falla puede ser mayor a la trifásica.

## 5.5. Equipos para detectar fallas y limitar sus efectos

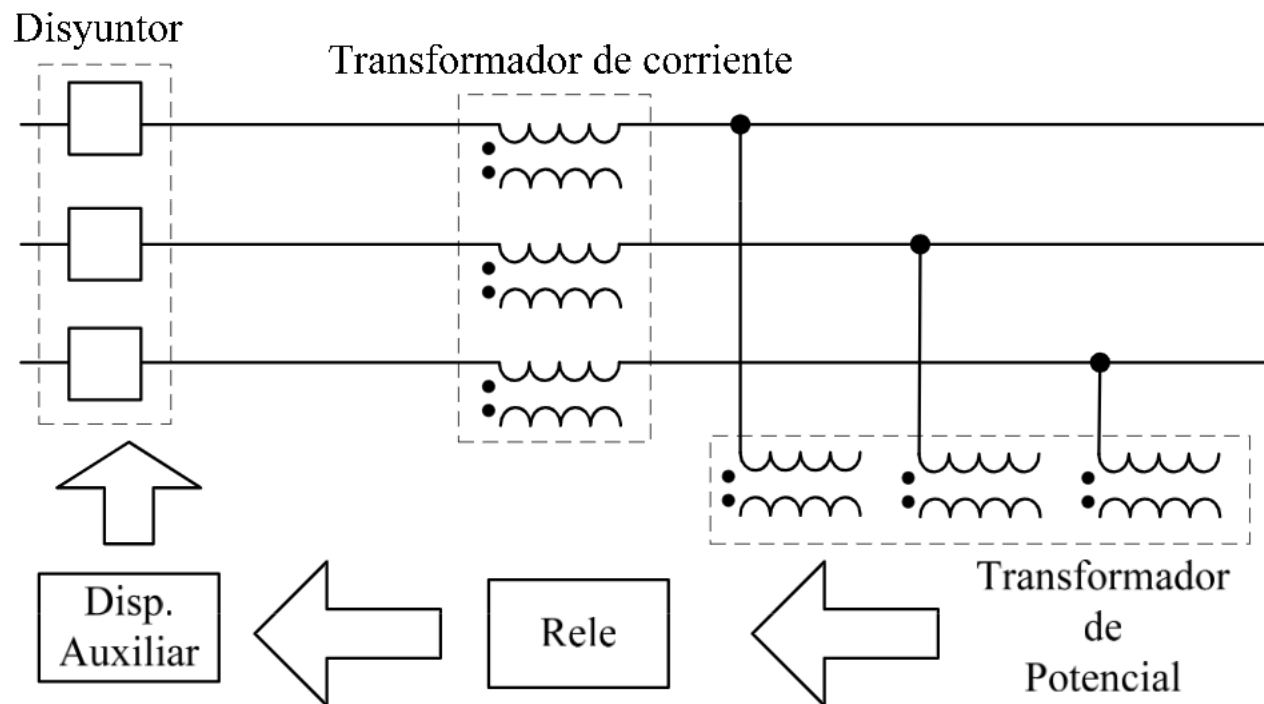
---

- En el objetivo de eliminar las anomalías o fallas de un sistema eléctrico, se incorporan una serie de componentes e instalaciones asociadas con el fin de eliminar completamente los efectos de estas anomalías, esto no es posible y aproximarse a esta solución es muy caro, en la práctica se reduce en lo posible los efectos de las anomalías.
- Los equipos utilizados para la detección de las fallas son:
  - *Relés*. Son dispositivos que reciben información del sistema, y pueden discriminar condiciones normales y anormales de operación; es básicamente un equipo de detección. Los relés pueden ser de dos tipos:
    - Relés electromecánicos (Antiguos).
    - Relés electrónicos.
  - *Fusibles*. Son elementos cuya función es detectar sobrecorrientes, su funcionamiento se basa en el hecho que un material atravesado por una corriente suficientemente grande puede fundir el dispositivo conductor interrumpiendo el paso de la corriente. Los fusibles e interruptores son elementos utilizados para despejar cortocircuitos o sobrecorrientes.
  - *Pararrayos*. Son dispositivos limitadores de sobretensión, se basan en el hecho de a partir de un nivel de tensión de ruptura fijado, el pararrayo se hace conductor a tierra, a medida que la sobretensión es mayor a la tensión de ruptura la resistencia que presenta disminuye eliminando rápidamente las sobretensiones.
- Los fusibles, interruptores y pararrayos constituyen los llamados equipos limitadores.

## 5.6. Introducción a los Sistemas de Protección

---

- Un sistema de protecciones es un conjunto de elementos y de circuitos de control unidos entre sí cuya función es detectar cualquier falla y proteger a uno o más equipos del sistema.



## 5.6. Introducción a los Sistemas de Protección

---

- *Transformadores de medida.* (Transformadores de corriente T.C, Transformadores de potencial T.P.) son dispositivos que permiten obtener información del sistema en forma de tensiones y corrientes.
- *Relés.* Es un dispositivo capaz de discriminar condiciones normales y anormales de operación, que cierran y abren contactos que habilitan en forma de detector directa o indirectamente los circuitos de apertura del interruptor.
- *Interruptor.* Este elemento accionado por el relé (automáticamente) o por el operador (manualmente) cumplen la función de aislar los equipos en carga.

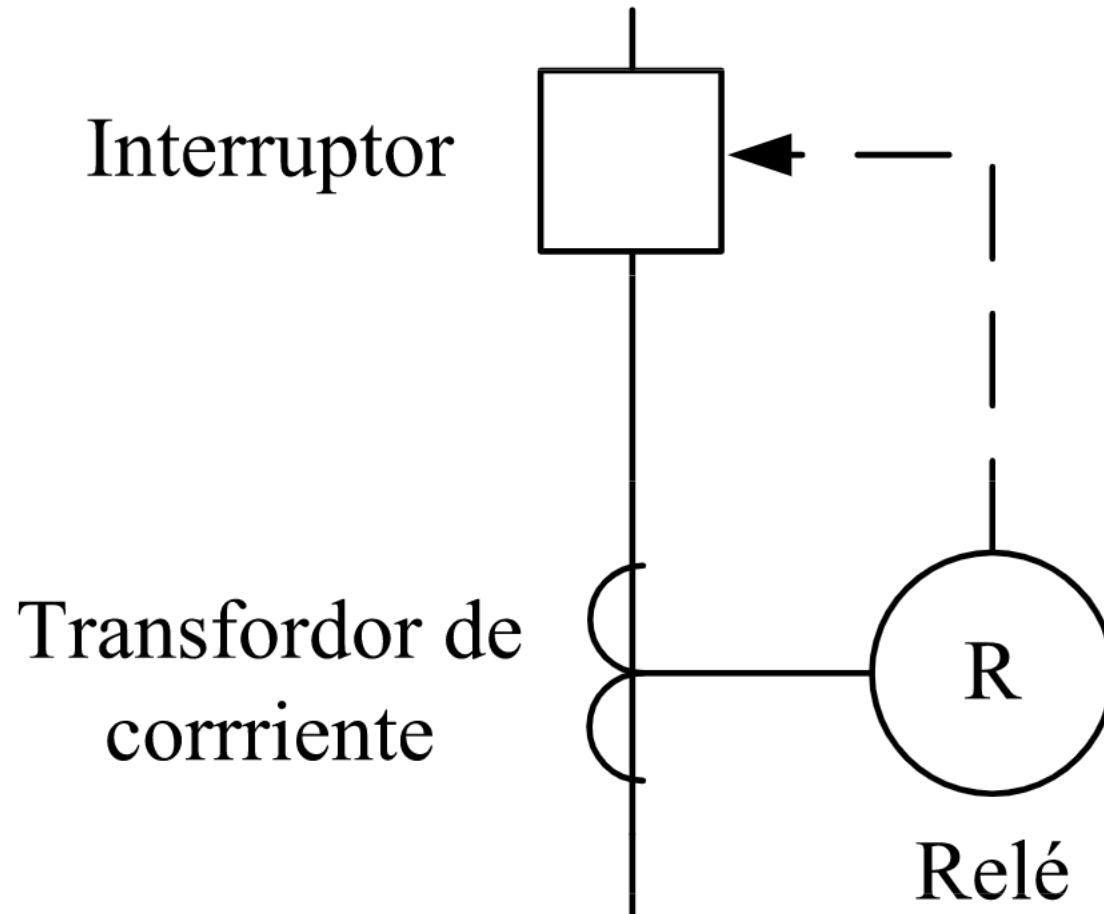
## 5.6. Introducción a los Sistemas de Protección

---

- Un interruptor puede interrumpir un circuito en condiciones normales en cambio un seccionador que solo permite aislar desde el punto de vista dieléctrico dos puntos del circuito y no pueden trabajar con carga.
- *Equipos de Control.* son los elementos y dispositivos que conectan a los anteriores. *Ejemplo.* el alambrado, comunicadores de información de ondas portadoras y dispositivos auxiliares (suiches, lámparas, alarmas, relés eléctricos).

## 5.6. Introducción a los Sistemas de Protección

---



## 5.7. Consideraciones para la Selección del Esquema de Puesta a Tierra del Neutro

---

- Es usual conectar a tierra los neutros de un sistema para tensiones mayores a 35.4 kV. La puesta a tierra de los neutros de un sistema de potencia juega un papel importante en las sobretensiones por fallas y corrientes de cortocircuitos. Un sistema puede estar puesto a tierra de diferentes modos, siendo los casos extremos:
  - Neutro aislado de tierra.
  - Neutro sólidamente aterrado.

## 5.7. Consideraciones para la Selección del Esquema de Puesta a Tierra del Neutro

---

- En el proceso de selección del esquema de aterramiento se deben tener en cuenta los siguientes factores:
  - Las magnitudes de las corrientes que resultan de fallas a tierra.
  - Las magnitudes posibles de sobretensiones transitorias.
  - Las magnitudes de sobretensiones temporales.
  - Localización de las posibles fallas.
  - La seguridad de los operadores, tensión de paso y toque.
- Para limitar las sobretensiones en situación de falla se aterran los sistemas de potencia, existen muchas y variadas formas de conectar los neutros a tierra, la diferencia entre los distintos esquemas son los valores de la corriente de falla y las sobretensiones que se presentan.
- En los casos extremos, neutro aislado, las sobretensiones son grandes mientras que las corrientes de falla son pequeñas, caso contrario de la conexión sólidamente aterrado, donde las corrientes de fallas son intensas y las sobretensiones pequeñas.
- Para equilibrar las condiciones de corriente de cortocircuito y sobretensiones, se suele colocar una impedancia entre el neutro y tierra.
- *Sistema efectivamente aterrado.* Se dice que un sistema se encuentra efectivamente aterrado cuando la tensión en las fases sanas, en régimen permanente, para el caso de una falla línea a tierra no excede del 80% de la tensión de la línea.

## 5.7. Consideraciones para la Selección del Esquema de Puesta a Tierra del Neutro

---

- Existen varias formas de conectar el neutro de un sistema de potencia a tierra, desde los casos extremos en los que no hay conexión alguna (*neutro aislado*), hasta llegar el *neutro sólidamente puesto a tierra*.