

ELC-30514  
Sistemas de Potencia I

---

# CAPITULO 2

## Representación de Sistemas de Potencia

Prof. Francisco M. González-Longatt

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

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

# 1. Introducción

---

- El estudio de los grandes sistemas de potencia, desde el punto de vista cuantitativo, obliga a una representación fiel de las características y elementos que conforman al sistema de potencia.
- Pudiéndose distinguir dos muy diferentes modos de representación, *la individual* de cada componentes, destinado al análisis de operación en forma aislada, y la más compleja aún, *la integración de todos los elementos* para realizar la simulación del comportamiento del sistema en forma global, lo que permitirá estudiar en condiciones normales o anormales al sistema de potencia.

## 2. Representación de SP

---

- Uno de los aspectos más importantes a considerar el estudio de los sistemas eléctricos de potencia, es su representación, la cual sin duda es *el punto de partida de los análisis y estudios posteriores*.
- La representación de un sistema de potencia, en forma más sencilla va consistir de un *diagrama*, en el cual se han de colocar toda la información de los elementos y estructuras que constituyen el sistema de potencia.

## 2. Representación de SP

---

- La forma y composición de la representación del sistema de potencia va a depender en forma directa del análisis que se pretenda llevar a cabo; de ahí, que sean posibles elaborar dos tipos de diagramas, uno en el cual se realice una representación general del sistema pero informativa (*Diagrama unifilar*), y otra exhaustiva y particular a cada uno de los elementos que conforman el sistema de potencia con sus valores (*Diagrama de Impedancia*).
- La realización de un diagrama del sistema de potencia, en donde el diagrama completo del sistema trifásico se realizado, es pocas veces útil y mucho menos necesario para llevar la más uniforme y detallada información del sistema, ya que en muchas ocasiones en vez de mostrar la información la esconde.

## 2.1. Diagrama Unifilar

---

- En el análisis de un circuito eléctrico trifásico balanceado en condiciones simétricas, se puede realizar la simplificación del estudio tomando *un circuito monofásico equivalente, conformado por una de las líneas y su respectivo neutro de retorno.*
- En el caso de los sistemas de potencia reales, su *naturaleza es trifásica*, en el cual se generan *tensiones y corrientes balanceadas*, pero en el cual las impedancias por fase difieren (por asimetrías de las líneas no transpuestas, imperfecciones en generadores y transformadores, naturaleza asimétrica de la carga, etc), se pueden considerar como *totalmente simétricos balanceados*.
- De modo que en raras ocasiones se hace necesario emplear una representación más detallada del sistema de potencia que la de su equivalente monofásico.

## 2.1. Diagrama Unifilar

---

- Cuando un equivalente por fase de un sistema trifásico es simplificado suprimiendo el camino de cierre de corrientes por el neutro[1], y se sustituye cada elemento por un símbolo normalizado y estandarizado surge, como resultado el denominado *diagrama unifilar*.

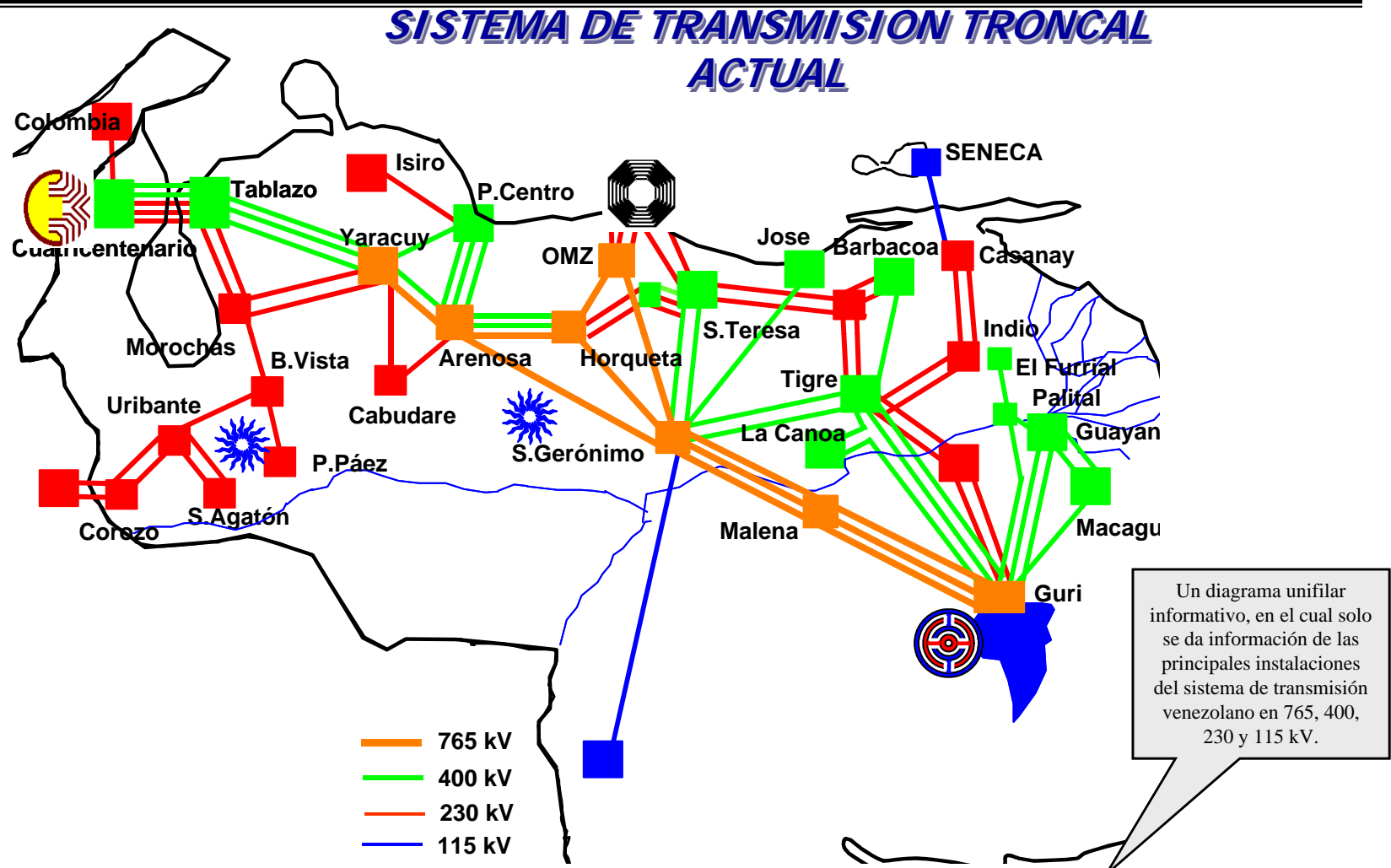
[1] Debido a que los sistemas de potencia son trifásicos balanceados independientemente que estén constituidos por tres hilos o tres hilos y un neutro, se puede utilizar la representación por una sola fase

## 2.1. Diagrama Unifilar

---

- Los objetivos de un diagrama unifilar son:
  - Permitir una representación del sistema en forma más simple.
  - Mostrar concisamente los datos más importantes o características del sistema.
- La cantidad de información y los elementos que son representados en el diagrama unifilar dependen del tipo de estudio que se realiza.

# 2.1. Diagrama Unifilar



**Estructura del Sistema Interconectado Nacional (1999)**



## 2.1. Diagrama Unifilar

---























- *Los símbolos de los elementos eléctricos empleados en los diagramas unifilares, se encuentran normalizados, de manera que se permita una interpretación fiel en cualquier momento.*
- *La estandarización o normalización para los elementos del sistema de potencia, trae como consecuencia que pueda existir representaciones distintas para los mismos elementos, dependiendo del país o de la empresa en que se realice el estudio.*

## 2.1. Diagrama Unifilar

### Diferentes Estándares a Nivel Regional y Mundial

<i>Siglas</i>	<i>Significado</i>	<i>País</i>
Estándares Europeos		
CENELEC	<i>European Committee for Electromechanical</i>	Comunidad Económica Europea
BS	<i>British Standard</i>	Inglaterra
DIN	<i>Deutsche Institut Für Normung</i>	Alemania
IEE	<i>Institute of Electrical Engineer</i>	Inglaterra
CEI	<i>Comitati Electritecnico Italiano</i>	Italia
VDE	<i>Verband Deutsher Elektrotechniker</i>	Alemania
Estándares Americanos		
ANSI	<i>American National Standard Institute</i>	EE.UU.
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineer</i>	EE.UU.
ISA	<i>Instrument Society of America</i>	EE.UU.
UL	<i>Underwriters Laboratories</i>	EE.UU.
Estándares Mundiales		
IEC	<i>International Electromechanical Institute</i>	

## Símbolos de Elementos Generales de Sistemas de Potencia, Norma ANSI e IEC

	<i>Norma IEC</i>	<i>Norma ANSI</i>
Transformador de dos devanados		
Transformador de tres devanados		
Reactor		
Impedancia		
Sistema exterior		
Generador		
Motor de inducción		
Motor de síncrono		
Carga		
Fusible		
Interruptor de potencia		

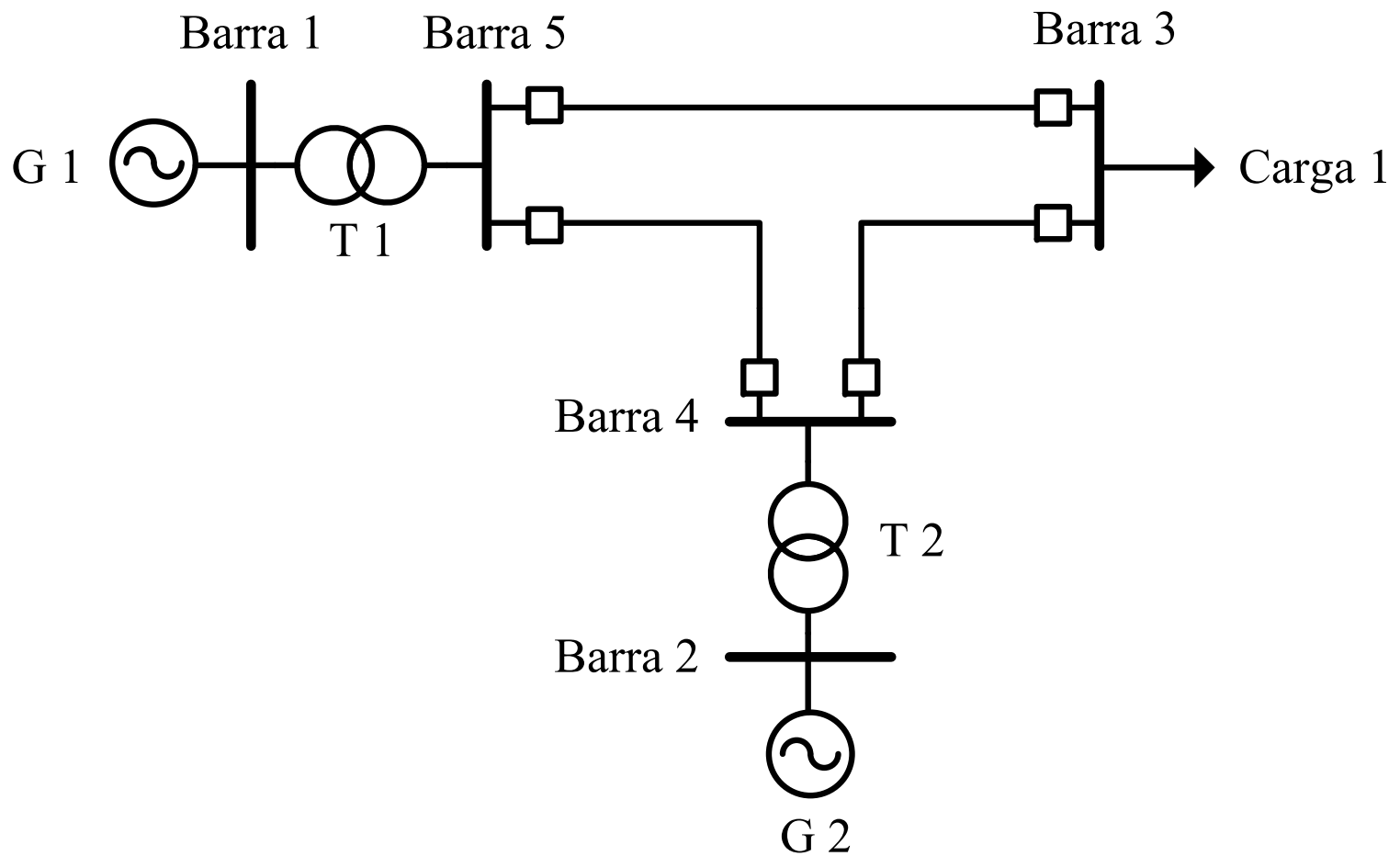


Diagrama Unifilar de un sistema de potencia típico: Norma IEC

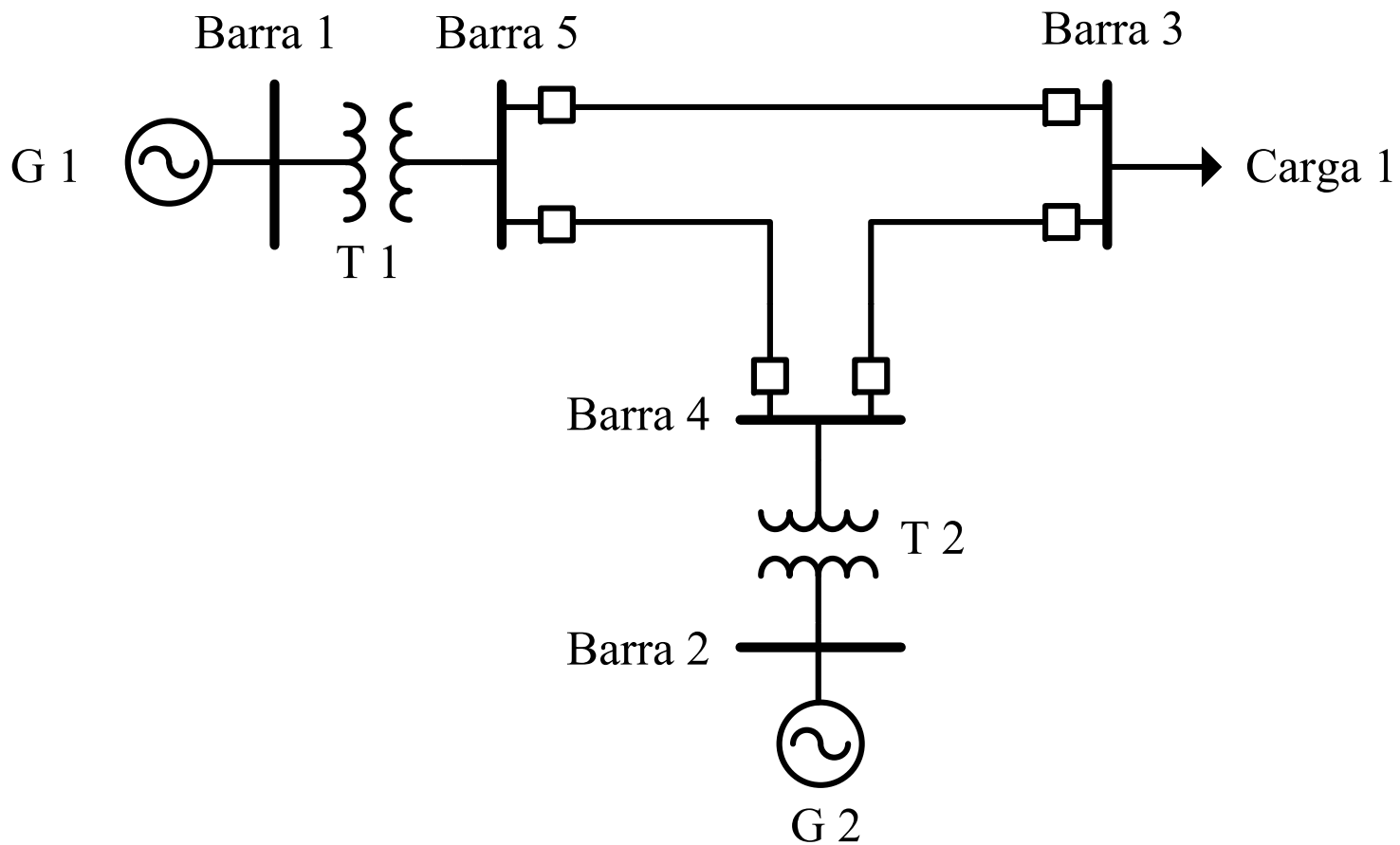


Diagrama Unifilar de un sistema de potencia típico: Norma ANSI

## 2.2 Diagrama Trifilar

---

- En ocasiones el estudio, o el análisis que se realiza a los sistemas de potencia requieren de una información completa, de cada uno de los elementos que están conectados en las fases del sistema de potencia.
- Los *diagramas trifilares*, son una representación completa de los elementos conectados a las tres fases del sistema de potencia, en donde se detalla con una simbología adecuada, conteniendo la información de cada elemento.

## 2.2 Diagrama Trifilar

---

- La representación trifilar, incluye la conexión de todos los elementos por fase y en especial aquellos elementos conectados al neutro del sistema, esto resulta útil, ya que aclara detalles específicos de conexión en los elementos. En la construcción de instalaciones eléctricas de potencia: centrales de generación, subestaciones, etc., se suelen entregar el diagrama unifilar esquemático de la forma de conexión eléctrica de los equipos, acompañado de un diagrama trifilar, donde se presentan los principales detalles de conexión de los elementos.
- En aquellos casos en que se requiere un conocimiento exacto de los modos de conexión de los elementos del sistema de potencia, se hace uso del diagrama trifilar; su principal desventaja es que aglutina demasiada información y por lo general, estos planos son de dificultosa lectura.

# 3. Modelado

---

- El *modelado a escala de un sistema de potencia, como medio para el análisis del rendimiento es impractico.*
- Los modelos a escala de ciertos componentes mecánicos de los sistemas de potencia son usados para evaluar sus características.
- Esto es frecuente en el caso con elementos de plantas hidroeléctricas, tales como turbinas, casos de espirales, compuertas, tuberías forzadas, etc.
- Sin embargo, mucha experiencia es requerida para establecer la escala y los factores de normalización, construir el modelo, obtener datos significativos por mediciones, e interpretar y extrapolar los resultados.

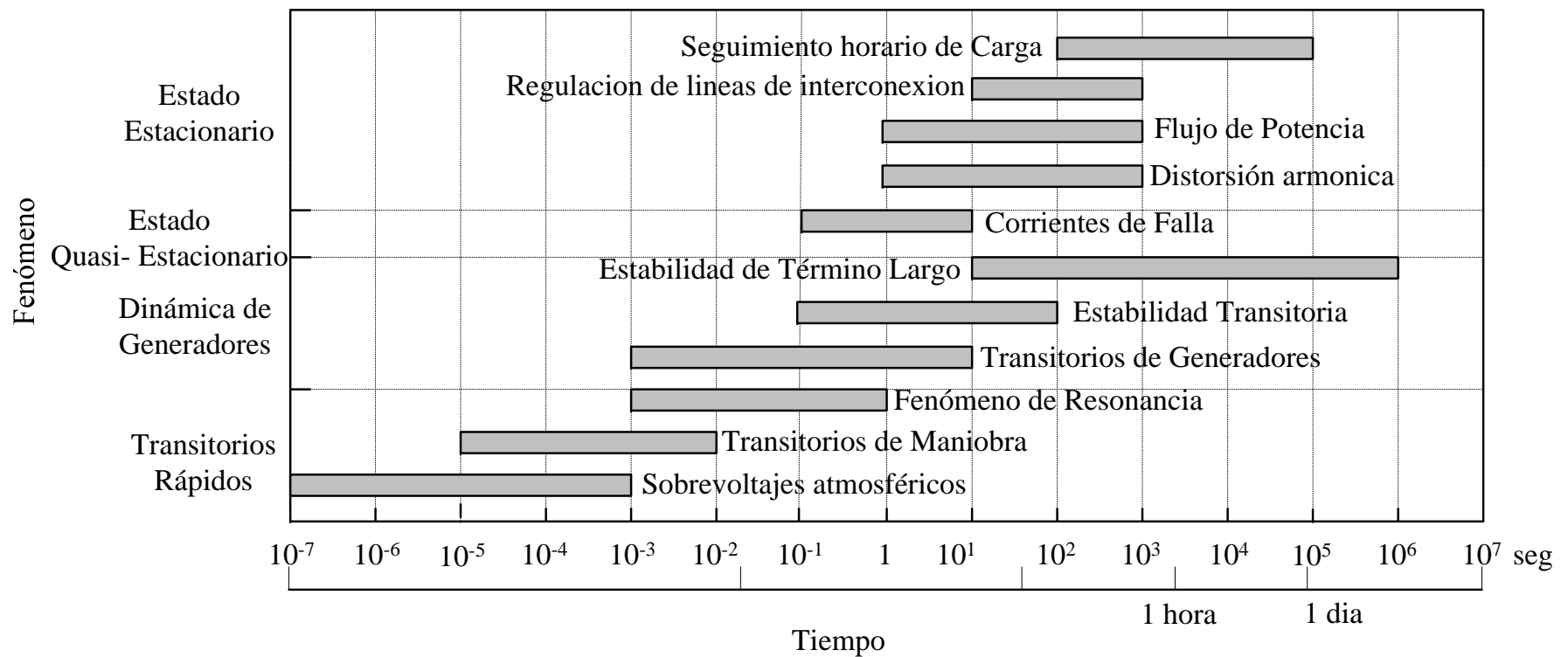


# 3. Modelado

---

- Las *computadoras digitales pueden ser programadas para resolver un gran número de ecuaciones simultáneas* fácilmente y emprender sin mucho esfuerzo el manejo de álgebra y grandes matrices.
- Esto hace a las *computadoras particularmente útil para aplicaciones en el análisis de sistemas de potencia.*
- Una inmensa variedad de programas han sido escritos para estudiar un incremental número en el área eléctrica.
- Estos programas son usualmente elaborados para obtener datos información en la forma números resultando más eficiente que los ajustes de las computadoras analógicos, pero esto obliga a que el *análisis del sistema de potencia requiera modelar el sistema cuantitativamente*

# 3.1. Escala de Tiempo



## 3.1. Escala de Tiempo

---

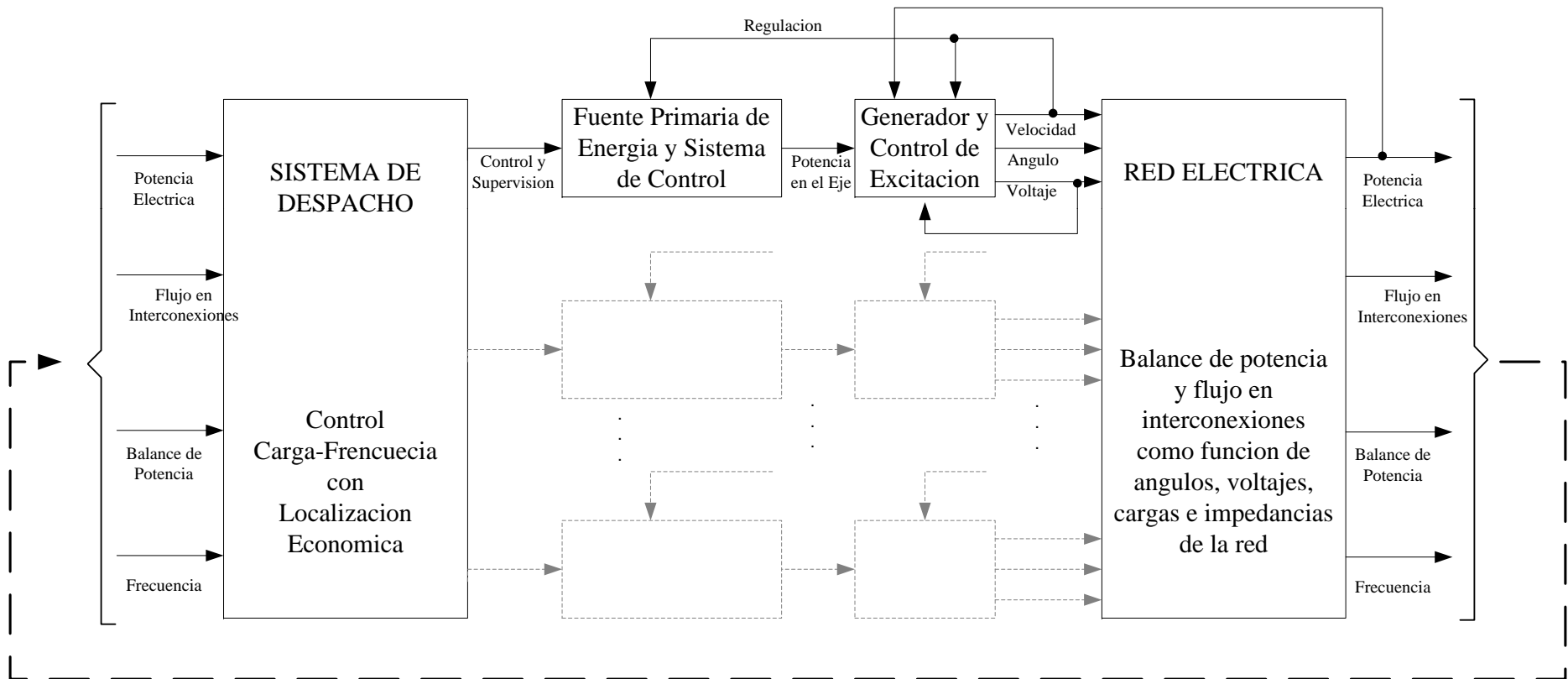
- Quizá la más importante clasificación del fenómeno dinámico es su rango de tiempo natural de respuesta.
- La estructura de escala de tiempo, categoriza el fenómeno dinámico que ocurre en el sistema de potencia de acuerdo a escala de tiempo o la banda de frecuencia, en la cual el fenómeno físico de interés ocurre.
- Por un lado del espectro de tiempo, están los fenómenos que tienen lugar en micro a milisegundos, tales como los transitorios inducidos por descargas atmosféricas, transitorios de maniobra, conmutación de semiconductores en convertidores electrónicos de potencia, y la interrupción de corrientes de falla.

## 3.1. Escala de Tiempo

---

- En el otro lado extremo del espectro de tiempo, están los fenómenos que toman algunos minutos u horas e incluso hasta semanas; incluyen fenómenos como la administración de los recursos energéticos.
- La naturaleza del tiempo de duración de estos procesos es tal que el control automático de esos procesos no es involucrado sino mas bien las decisiones operativas y programada son implementadas manualmente en respuesta a resultados de sofisticados técnicas de programación no lineal.

## 3.2. Escala Física



## 3.2. Escala Física

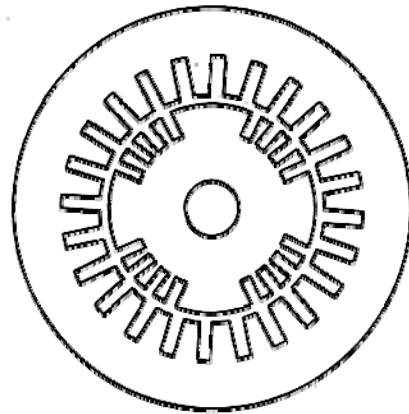
---

- La estructura física describe los principales componentes del sistema de potencia, las relaciones entre ellos, equipo de control, también los principios de conversión de energía . Una conveniente visualización de los procesos mostrando el acoplamiento entre las más importantes variables es desarrollada en el diagrama de bloques.
- Históricamente, ha sido dividido en dos subsistemas: mecánicos y eléctricos, pero clasificación no es absoluta, debido a que el lado eléctrico claramente contiene dinámicas mecánicas y viceversa. Además ambos lados están acoplados a través de funciones de supervisión y control desde el centro de despacho de la energía.

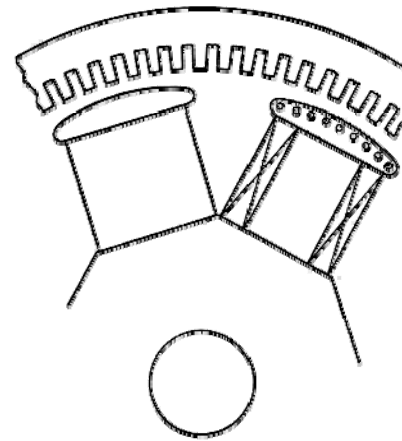
## 4. Modelo del Generador

---

- Las máquinas sincrónicas son empleadas en los sistemas de potencia como generadores de potencia activa y reactiva, aunque en ocasiones se emplean en forma exclusiva para la generación de potencia reactiva (condensador sincrónico).



(a)



(b)

**Construcción de tipos de rotores (a) rotor cilíndrico (b) rotor de polos salientes**

# 4. Modelo del Generador

---

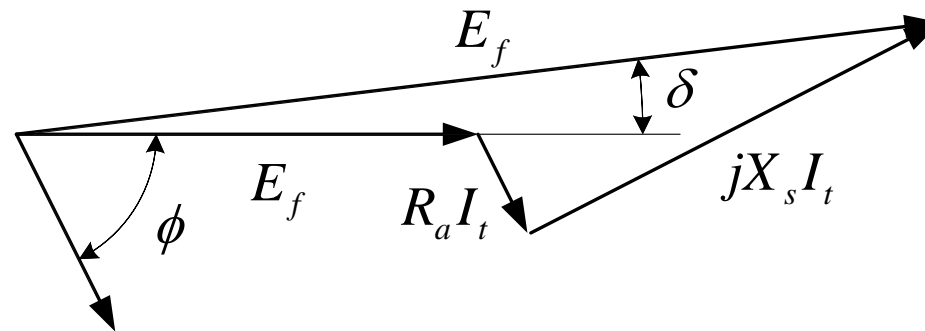
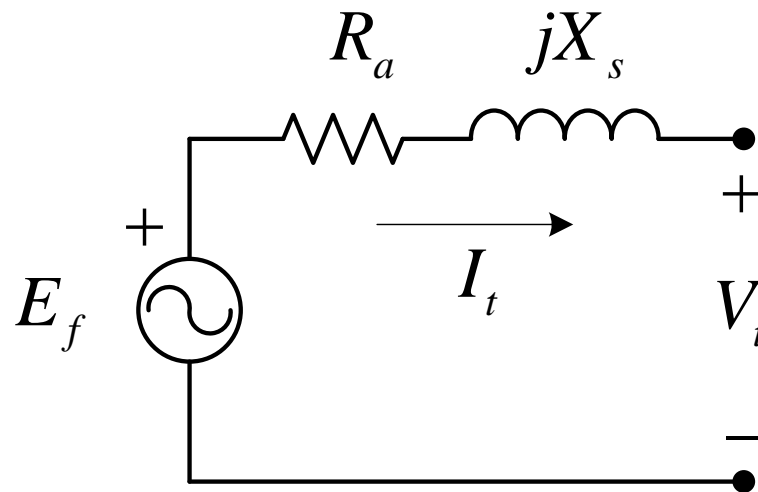


Diagrama Fasorial de un Generador de Rotor Liso



Modelo equivalente de una máquina síncrona de rotor liso en condiciones no saturada



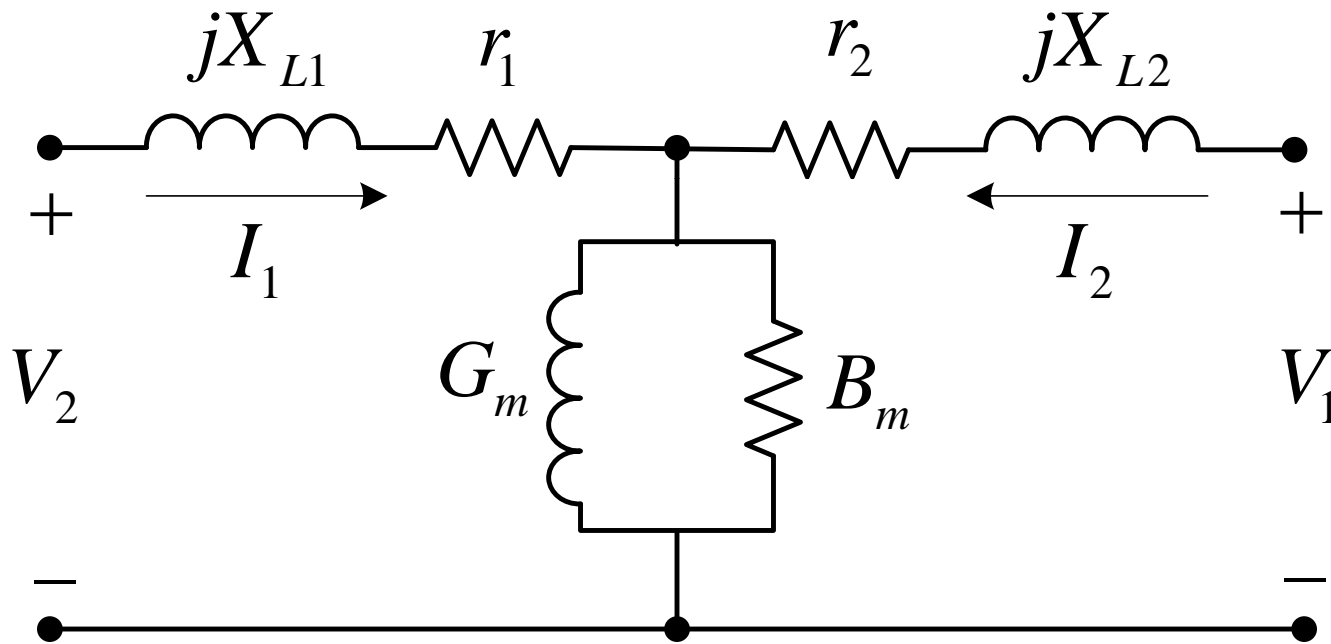
## 5. Modelo Transformador

---

- El transformador de potencia, es el elemento del sistema de potencia, que se encarga de modificar los niveles de tensión y corriente, adaptándolos a los requerimientos del sistema.
- El transformador más simple consiste en dos bobinas (primario - secundario, alta – baja), entrelazados sobre un mismo núcleo magnético.
- (Se trata el caso más simple, un transformador de potencia monofásico de dos devanados *Two-Windings*).

# 5. Modelo Transformador

---

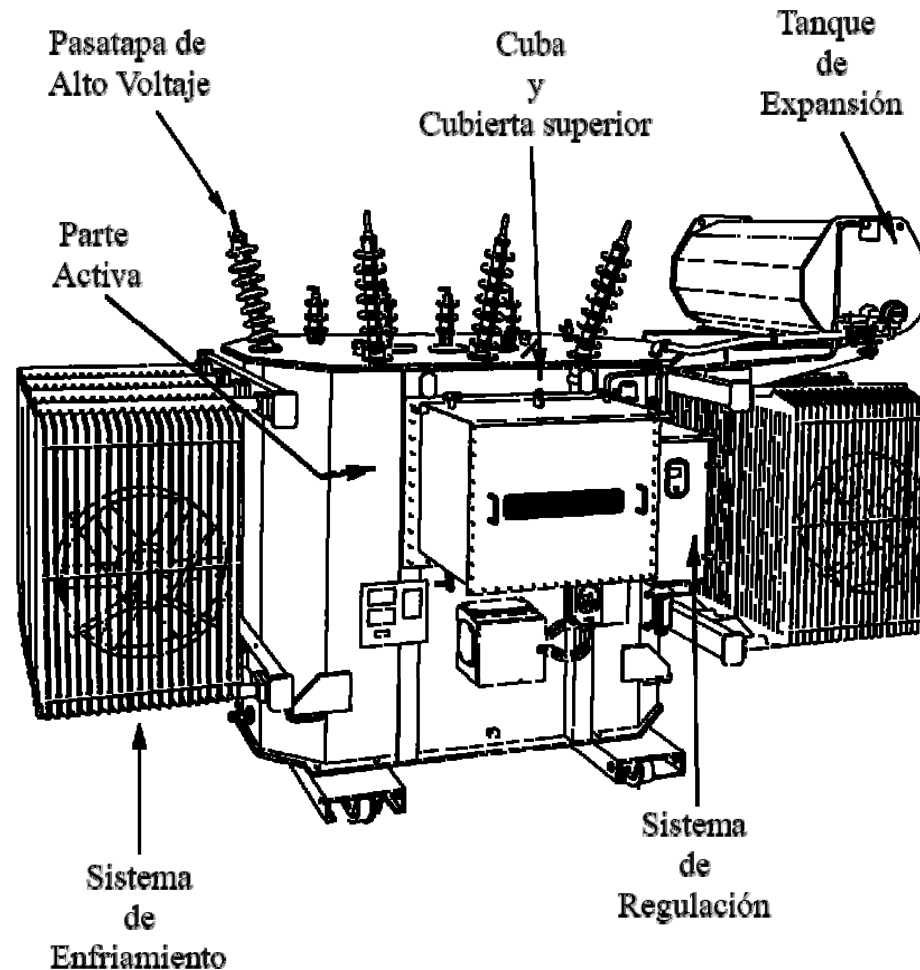


Modelo Equivalente T, de un Transformador de dos Arrollados.

Nota: Todas las impedancias están referidas a un solo lado

# 5. Modelo Transformador

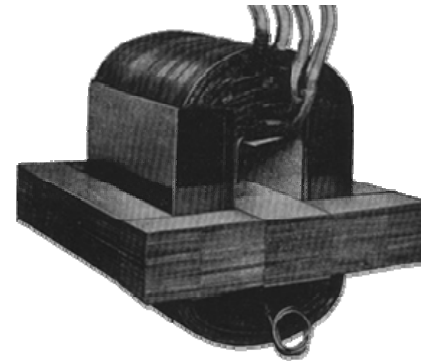
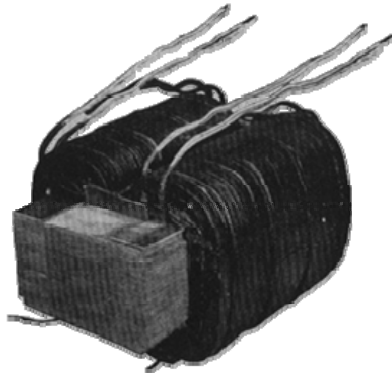
## Partes de un Transformador de Potencia



# 5. Modelo Transformador

---

- Los transformadores pueden ser clasificados a saber bajo los siguientes criterios:
  - Forma de construcción
  - Número de fases
  - Tipos de refrigeración.



Diseños de contracción del núcleo de transformadores, Tipo *Core* (Izquierda), Tipo *Shell* (Derecha)

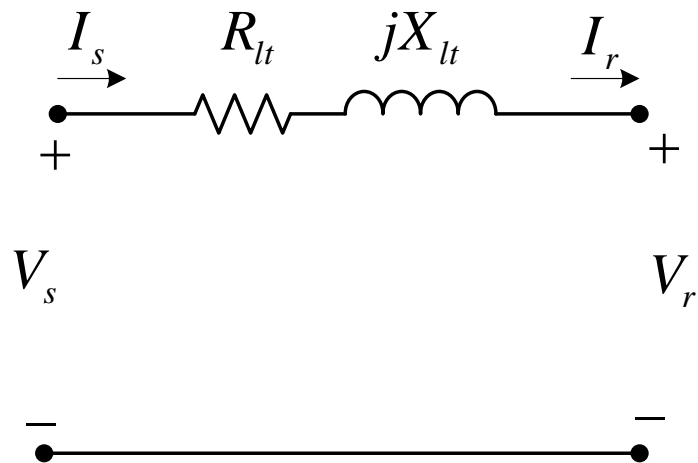
## 6. Modelo de Línea

---

- Los elementos de mayor extensión dentro de los sistemas de potencia son las líneas de transmisión, y es importante conocer su modelo equivalente, para simular su comportamiento en cualquier situación dentro del sistema de potencia.
- Las líneas de transmisión normalmente funcionan con cargas trifásicas equilibradas, aunque no estén dispuestos sus conductores equiláteralmente, e incluso sin transposición, la influencia de la asimetría es pequeña, y se pueden considerar como elementos trifásicos equilibrados.

# 6. Modelo de Línea

---

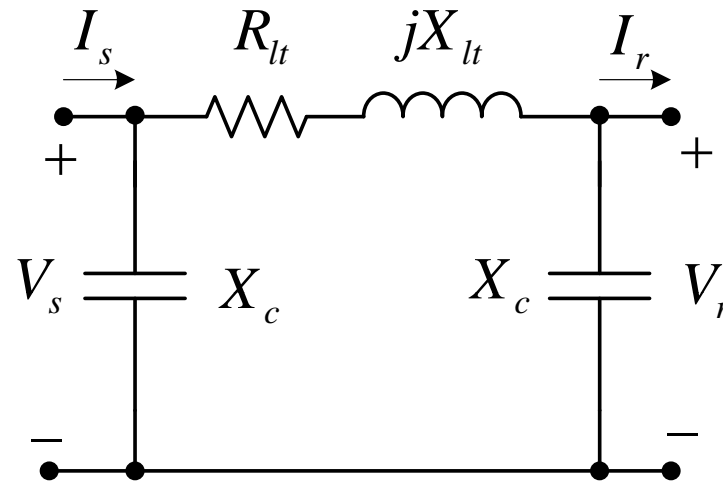


Modelo circuital para una línea de transmisión corta

$$V_s = (R_{LT} + jX_{LT})I_s + V_r$$

# 6. Modelo de Línea

---



Modelo equivalente  $\Pi$ , para una línea de transmisión media

$$\begin{cases} V_s = \left( Z \frac{Y}{2} + 1 \right) V_r + I_r \\ I_s = \left( 1 + Z \frac{Y}{4} \right) V_r + I_r \left( 1 + Z \frac{Y}{2} \right) \end{cases}$$

## 7. Modelo de las Cargas

---

- Las cargas son elementos empleados muy frecuentemente en la representación de un sistema de potencia, por lo general se presentan como elementos que *consumen potencia activa y reactiva*.
- La representación fiel y exacta de una carga, es un *problema complejo*.
- Primeramente las cargas han de ser clasificadas en dos grandes grupos: *cargas estáticas* y *cargas dinámicas*; en atención a su comportamiento ante un cortocircuito.



## 7. Modelo de las Cargas

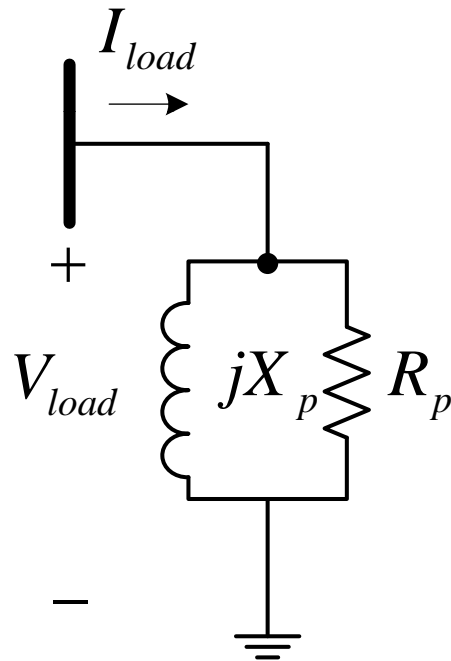
---

- Las cargas *estáticas* son aquellas que tienen un comportamiento tal que ante *un cortocircuito no pueden entregar corriente*; son simplemente, elementos que *consumen potencia* (activa y reactiva) que se asume constante independientemente de las condiciones de falla que se presenten; esto es una idealización de las cargas.
- Este tipo de carga es *simulada por elementos pasivos en forma de parámetros concentrados*; que *consumen la potencia constante*.

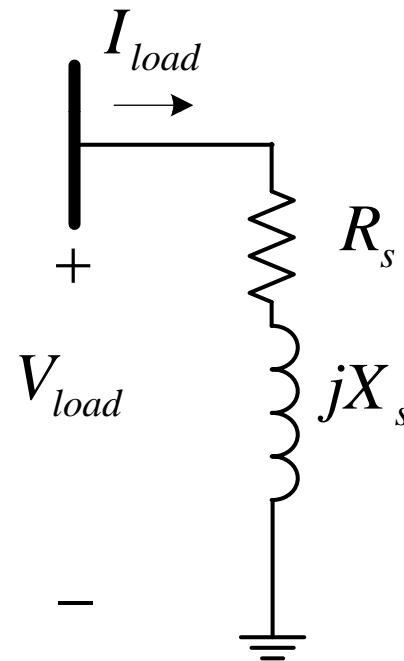
# 7. Modelo de las Cargas

---

- Este tipo de carga es *simulada por elementos pasivos en forma de parámetros concentrados; que consumen la potencia constante.*



(a)



(b)

Modelo de Carga Estática. (a) Modelo paralelo (b) Modelo serie

## 8. Diagrama de Impedancia y Reactancias

---

- En el estudio del comportamiento cualitativo de un sistema en condiciones de régimen permanente o al presentarse una condición anormal, el diagrama unifilar debe transformarse en un diagrama que muestra las impedancias de todos los elementos del sistema para poder emprender el estudio analítico que en definitiva establece las condiciones de operación.
- Si se considera un diagrama unifilar y se procede a sustituir cada uno de los elementos por su modelo equivalente, se crea un nuevo esquema denominado *diagrama de impedancias*.

## 8. Diagrama de Impedancia y Reactancias

---

- Este diagrama de impedancias, *permite el calculo de las variables eléctricas* (tensión, corriente, potencia e impedancia) en unidades reales (voltios, amperes, volt-amperes, Ohmios, respectivamente) *a partir del planteamiento de simples ecuaciones circuitales.*

## 8. Diagrama de Impedancia y Reactancias

---

- *La construcción de los diagramas de impedancias debe ser cuidadosa.*
- En sistemas con varios niveles de tensión o multitransformadores; ya que por teoría de transformadores se conoce que la impedancia del secundario de un transformador puede referirse al primario, multiplicando dicha impedancia por el cuadrado de las vueltas del arrollamiento del primario y del secundario (relación de transformación);
- *Se evidencia la dependencia del valor de la impedancia de un sistema del lado de la transformador al que se refiera.*

## 8. Diagrama de Impedancia y Reactancias

---

- En el caso de los sistemas trifásicos con varios niveles de tensión o multi-transformadores, se debe además considerar si se trata de unidades o bancos trifásicos de transformación; además del grupo de conexión de sus devanados, etc.
- En conclusión los diagramas de impedancias debe ser contruidos con cuidado de manera de garantizar que todas las impedancias del sistema deben ser referidos a un mismo lado de uno de los transformadores; además de respetar grupos de conexión y tipos de transformadores

# 8. Diagrama de Impedancia y Reactancias

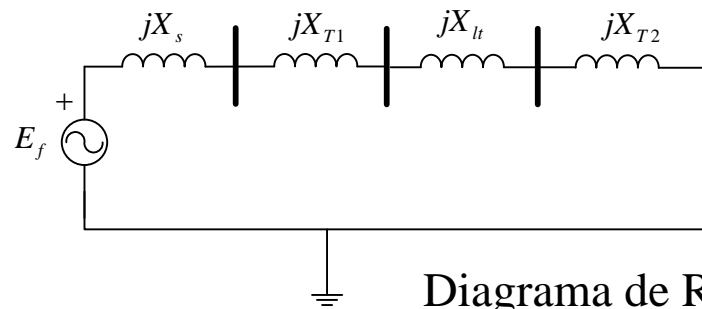
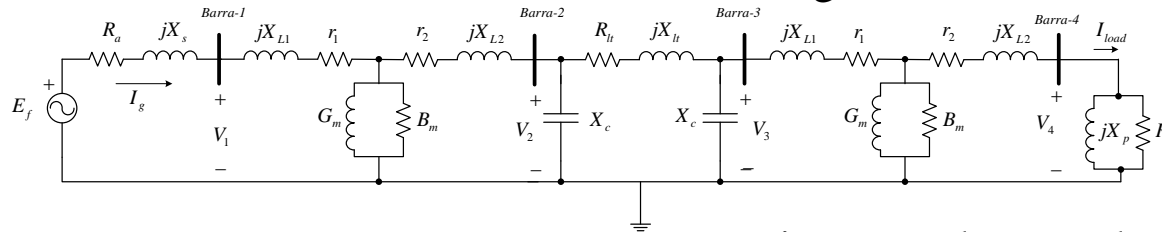
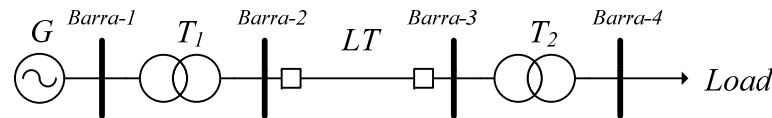
---

- Algunas simplificaciones pueden ser llevadas a cabo dentro del diagrama de impedancias, a manera de reducir los cálculos.
  - Se puede *despreciar la rama Shunt en el circuito equivalente*, ya que la impedancia de ella es muy grande con relación a las demás.

**Nota :** En el caso de los transformadores con Tap's (cambiador de tomas) es el que posee un gran número de derivaciones, no se toma en cuenta la posición del mismo debido a que la impedancia cambia.
  - Se *desprecia la parte resistiva de la impedancia* de los generadores y transformadores, debido a que ella es muy pequeña comparada con la resistencia ( $X \gg R$ ).
  - Se *desprecia todas las cargas que no sean contribuyentes* (estáticas), además que se debe tener cuidado si la carga está compuesta por motores, ya que su contribución puede ser importante.
  - Para las líneas de transmisión en un análisis manual se puede *despreciar la resistencia de la línea y las capacidades asociadas*.

# 8. Diagrama de Impedancia y Reactancias

- En los diagramas de impedancias sujetos a las consideraciones y simplificaciones anteriores, son denominados *diagramas de Reactancias*.

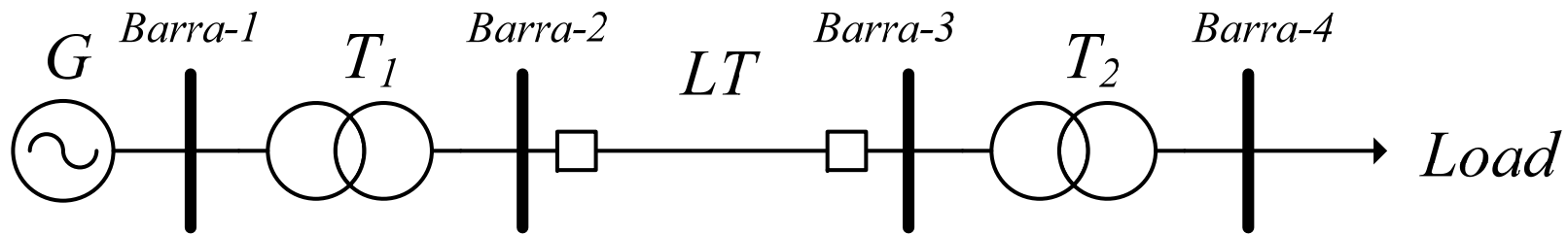




# 10. Ejemplo

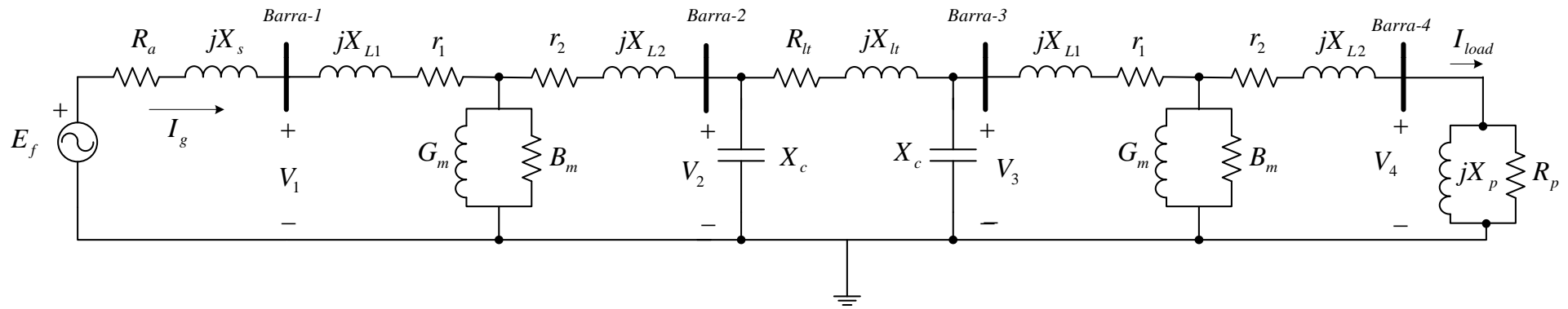
---

- Considere el diagrama unifilar de un sistema de potencia de estructura radial simple, es decir, un solo centro de generación y un centro de carga



# 10. Ejemplo

- Si se procede a sustituir cada elemento por su modelo equivalente, se obtiene el *diagrama de impedancias*.

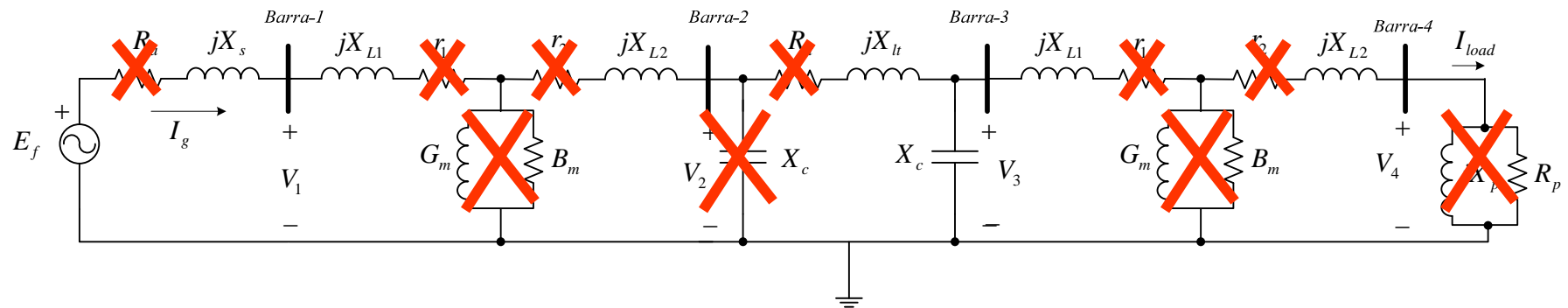


# 10. Ejemplo

---

- Una vez que se obtiene el diagrama de impedancias es sencillo llegar al de reactancia, para ello se debe realizar la consideración de que las partes resistivas en el sistemas de potencias son muy pequeñas en comparación de la reactancia.
- Si se realizan las respectivas las siguientes *suposiciones*:
  - Se desprecia la resistencia de los generadores, transformadores, líneas de transmisión, debido a que se considera muy pequeña comparada con la parte reactiva.
  - Se desprecia la rama de magnetización de los transformadores ya que se supone que la corriente de vacío de la máquinas es muy pequeña comparada con la de plena carga.
  - Se obvia el efecto de la capacitancia en las líneas de transmisión.
  - No se considera el valor de la carga estática

# 10. Ejemplo



# 10. Ejemplo

---

- Se construye finalmente el *diagrama de reactancias* del sistema.

