

Capítulo 2

Representación de Sistemas de Potencia

2.1 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 lo 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.

2.2 Representación de un Sistema de Potencia

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.

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.

2.2.1. Diagramas Unifilares (*One-Line Diagram*)

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.

Cuando un equivalente por fase de un sistema trifásico es simplificado suprimiendo el camino de cierre de corrientes por el neutro¹, y se sustituye cada elemento por un símbolo normalizado y estandarizado surge, como resultado el denominado *diagrama unifilar*.

Un diagrama unifilar es la representación del sistema trifásico que se obtiene al reemplazar los diferentes elementos del sistema en el equivalente por fase por simples símbolos utilizados y normalizados suprimiendo el camino de retorno.

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 de que se realiza.

Por ejemplo, para el Estudio de Flujo de Cargas, no es relevante que se represente la ubicación de los interruptores, caso contrario para el Estudio de Coordinación de protecciones, donde es transcendental la ubicación y características de los interruptores, relés, y transformadores de medida. En los estudios de Estabilidad en Régimen Transitorio, se hace necesaria la constante de inercia de las máquinas y las constantes de tiempo de los reguladores, información que no es necesaria en los estudios de Cortocircuito.

Los símbolos de los elementos eléctricos empleados en los diagramas unificares, 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

En Venezuela, COVENIN, Comisión Venezolana de Normas Industriales en su norma COVENIN 391, ha establecido los símbolos gráficos de uso común en la representación de esquemas y diagramas eléctricos de sistemas de potencia, con el fin de hacer más fácil el intercambio de información.

En Venezuela existe además CODELECTRA, Comité de Electricidad, quien junto a COVENIN son los organismos encargados de elegir los símbolos gráficos aplicados a los sistemas de potencia.

En general, COVENIN adoptó los símbolos estandarizados en las normas de la Comisión Electrotecnia Internacional (IEC), y cuando esta presenta varias alternativas para un mismo símbolo se escogió el que tenía un uso más generalizado en Venezuela.

En el ámbito mundial los símbolos eléctricos se encuentran regidos por:

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

Tabla 2.1. Diferentes Estándares a Nivel Regional y Mundial

Siglas	Significado	País
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 Deutscher 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>	

La American National Standard Institute (ANSI) y el Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) son los dos entes que a escala mundial poseen mayor reconocimiento en sus simbología².

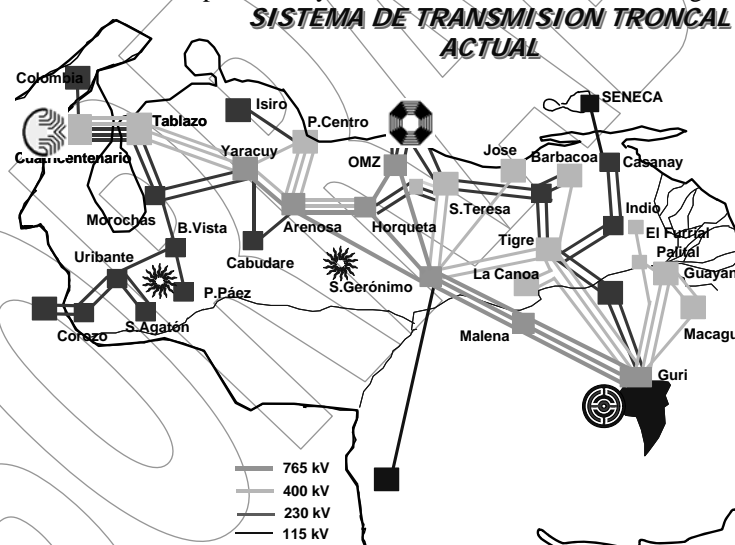


Fig. 2.1. Estructura del Sistema Interconectado Nacional (1999)

En la Figura 2.1, se muestra un diagrama unifilar informativo, en el cual solo se da información de las principales instalaciones del sistema de transmisión venezolano en 765, 400, 230 y 115 kV.

Barra: (*Bus*) es una conexión de impedancia cero, donde se conectan diferentes elementos de un sistema tal como: Transformador, Líneas, Generadores, Cargas, etc.

² Consultar IEEE (1971). *Graphics Symbols for Electrical and Electronic Diagrams Y32.2-1971*, o la norma : IEEE Std 315-1971.

Tabla 2.2. 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 síncronico		
Carga		
Fusible		
Interruptor de potencia		

En la Figura siguiente se muestra un ejemplo de un sistema de potencia tradicional

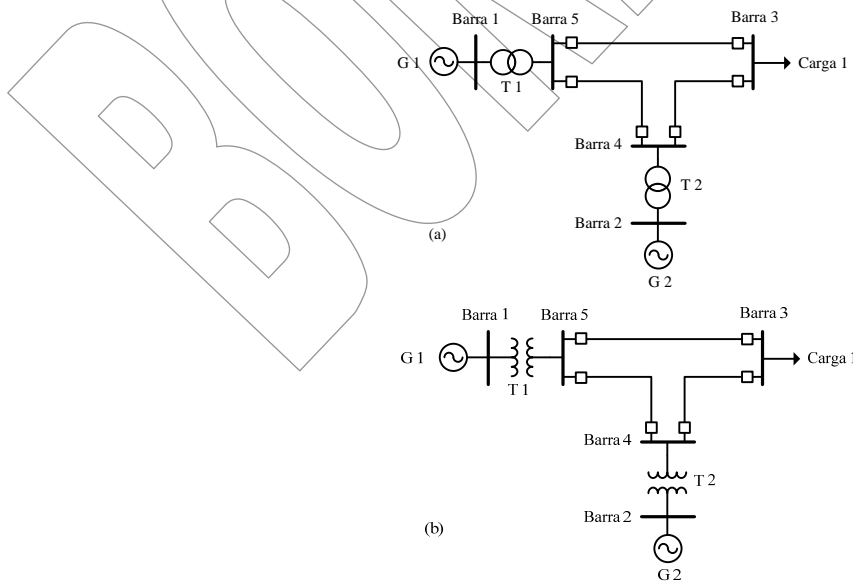


Fig. 2.2. Diagrama Unificar de un sistema de potencia típico, (a) Norma IEC (b) Norma ANSI

2.2.2. Diagramas Trifilares

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.

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.

2.3 Modelado (*Modeling*)

El modelado a escala de un sistema de potencia, como medio para el análisis del rendimiento es impracticable. Sin embargo, 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.

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 campo eléctrico. Estos programas son usualmente elaborados para obtener datos información en la forma números resultando más eficiente que los ajustes de las computadoras analógicas, pero esto obliga a que el análisis del sistema de potencia requiera modelar el sistema cuantitativamente.

El modelo de un elemento, es una abstracción de una situación real que permite poder simular el comportamiento del elemento cuantitativamente, sin llegar a un análisis físico real de la situación.

Sin duda, que los modelos pueden ir desde los más complejos y detallados a los más sencillos, todo función, de cuan tan exacto se requiera recrear la situación real; un modelo ideal, es aquel que es simple al tiempo que aproxima en forma fiel la situación real.

En el análisis de sistemas de potencia es necesario considerar todos los elementos que lo constituyen con sus respectivos modelos equivalentes, de manera de poder simular el comportamiento de cada elemento y en forma integral del sistema de potencia; el tipo de modelo y su exactitud va a depender de la naturaleza del estudio y la exactitud que se requiera.

Los elementos pasivos en los sistemas de potencia son tales como las líneas de transmisión, transformadores y capacitores, estos son considerados lineales son modelados por una o más de las cantidades eléctricas; resistencia, inductancia, capacitancia. Los elementos activos son tales como motores, generadores, condensadores sincrónicos, y otras cargas como hornos, elementos ajustables de velocidad, etc. Los elementos activos poseen componentes que son no lineales, pero que bajo algunas restricciones pueden ser considerados

lineales. Uno o más parámetros del modelo de unos elementos activo varían en función del tiempo, ángulo de fase, frecuencia, velocidad, etc.

2.4 Modelo del Generador Síncronico

Las máquinas síncronas 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 síncronico).

En función a la geometría de su rotor constructivamente se diferencian dos tipos de generadores: *Rotor Liso o cilíndrico* y *Rotor de Polos salientes* (ver Figura 2.2)

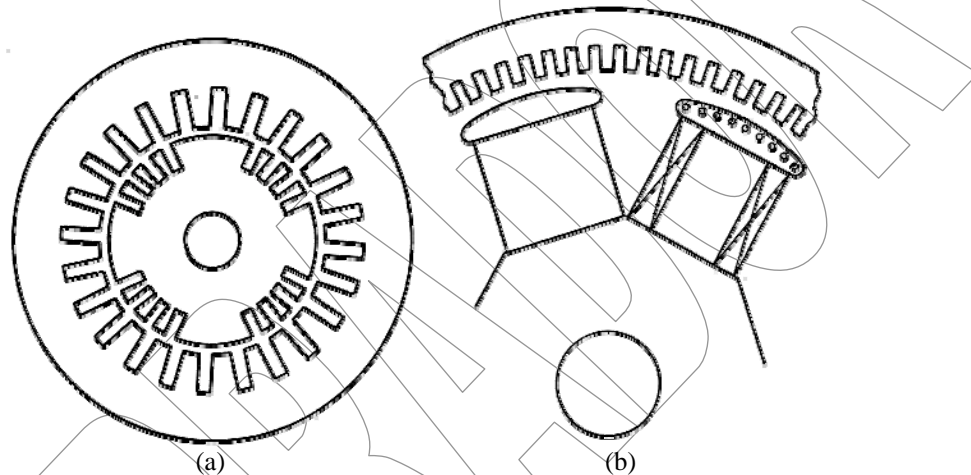


Fig. 2.3. Construcción de tipos de rotores (a) rotor cilíndrico (b) rotor de polos salientes

Los generadores cuya construcción poseen rotores lisos o cilíndrico, son característicos de las centrales térmicas y nucleares con una velocidad de giro elevadas (3000 o 3600 rpm y 1500 o 1800 rpm, para frecuencias de 50 y 60 Hz respectivamente) mientras que los rotores de polos salientes encuentran su aplicación en plantas hidroeléctricas, donde la velocidad del rotor, por lo general es menor, y en consecuencia el número de polos es mayor. La diferencia de aplicación estriba en gran parte por los requerimientos mecánicos a que esta parte móvil se ve sometida durante el giro.

En el caso de Venezuela, los generadores de la Central Hidroeléctrica Raúl Leoni, Gurí, son de polos salientes de 700 MVA (Casa de Máquinas II) que junto a las de Itaipú en Brasil/Paraguay son los generadores más grandes del mundo; por otra parte, en la planta termoeléctrica del Centro, los generadores son de rotor liso y de 400 MW de capacidad.

Aunque ambos tipos de construcciones para rotores de generadores son empleados en la generación de electricidad dentro de los sistemas de potencia, su comportamiento eléctrico se ve seriamente afectado por la naturaleza constructiva de su rotor.

En el caso del rotor liso, por su forma constructiva denota un entrehierro que es constante a todo lo largo de la superficie del rotor, por lo que la conductividad magnética será también igual en todas las direcciones. En el caso de los rotores de polos salientes, el entrehierro de espesor variable afecta de sobremanera los parámetros que caracterizan a la máquina.

Un punto importante, es establecer el circuito equivalente para el generador síncronico, para poder simular el comportamiento que el generador presentará ante cualquier situación en el sistema de potencia.

Para comenzar se tratará el caso más sencillo, el de la máquina síncronica de rotor liso.

Considere que se trata de una máquina de rotor cilíndrico en condiciones tal que no existe saturación y en régimen estacionario.

El generador de rotor liso, esta constituido por un bobinado trifásico en el estator, y por un bobinado monofásico en el rotor. Cuando el devanado rotórico es energizado con una corriente continua, se produce un campo magnético Φ_f estacionario respecto al rotor, pero rotativo con respecto al estator.

Cuando este campo interactúa con las bobinas arrolladas en el estator induce tensión en estos, igual en magnitud E_f , pero defasadas en el tiempo, ya que son afectadas por el campo en momentos diferentes.

El voltaje inducido E_f de cada fase esta retrasado en fase 90° respecto del campo magnético Φ_f . Si en los terminales del bobinado trifásico en el estator del generador, se conecta una carga balanceada, comenzará una circulación de corriente I , la cual produce un campo magnético Φ_{ar} en fase con estas corrientes, y que además rota a la velocidad del rotor y en su mismo sentido, y en la misma dirección del campo principal Φ_f . El campo estatorico Φ_{ar} se sumará o se restará con el campo principal, dependiendo del factor de potencia de la corriente estatorica I . El efecto de los campos estatoricos y rotorico combinados es un campo resultante Φ_r , el cual induce en el entrehierro un voltaje E_r , proporcional a la magnitud de Φ_r pero retrasado 90° . El voltaje en terminales de la máquina será el voltaje generado en el entrehierro, menos la caída de tensión en el bobinado es decir:

$$V_t = E_r - R_a I_t - jX_s I_t \quad (1)$$

siendo R_a , la resistencia óhmica del bobinado estatorico y X_s , la reactancia sincrónica.

Bajo las condiciones antes mencionadas el circuito equivalente por fase de la máquina consta de una fuente ideal de tensión E_r , que puede considerarse como la suma vectorial de la tensión E_f inducida por el campo del rotor, y E_{ar} por el del estator; y en serie con la resistencia del inducido R_a y la reactancia total o sincrónica X_s . La reactancia total es la suma de la reactancia principal o de reacción X_f y la reactancia de dispersión X_l .

Por último, el circuito equivalente de una máquina de rotor cilíndrico no saturado sometida a un sistema polifásico equilibrado queda representado por (por fase) una tensión E_f creado por el campo del inductor, en serie con una impedancia única, que recibe el nombre de impedancia sincrónica. La reactancia sincrónica X_s toma en consideración todos los flujos creados por las corrientes polifásicas equilibradas del estator, mientras que la tensión E_f toma en consideración el flujo creado por la corriente del rotor.

En el caso de una máquina de polos salientes, la reactancia del inducido depende del entrehierro y denota una dependencia direccional. La reactancia sincrónica se descompone entonces en una componente longitudinal X_d y una transversal X_q .

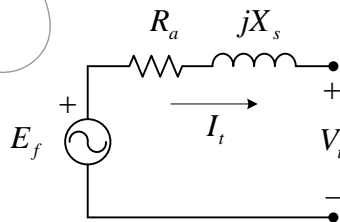


Fig. 2.4. Modelo equivalente de una máquina sincrónica de rotor liso en condiciones no saturada

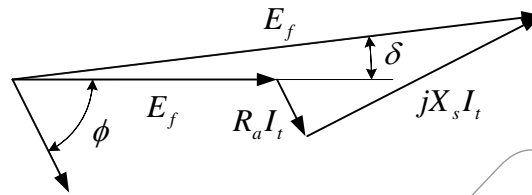


Fig. 2.5. Diagrama Fasorial de un Generador de Rotor Liso

Tabla 2.3. Reactancia aproximada de motores en porcentaje

Tipo de Motor o grupo de motores	Reactancia Subtransitoria X''_d	Reactancia Transitoria X'_d
<i>Individuales :</i>		
Sincrónicos, grandes, 6 polos	0.10	0.15
Sincrónicos, grandes, 8 - 14 polos	0.15	0.24
Inducción	0.25	-
<i>Grupos de Motores:</i>		
Sincrónicos, tensión > 600 V	0.15	0.25
Sincrónicos, tensión < 600 V	0.25	0.33
Inducción, tensión > 600 V	0.20	-
Inducción, tensión < 600 V	0.25	-

Fuente: Lazar, I (1969). *Calculating Industrial Short Circuit Current. Power Magazine*

Tabla 2.4. Valores Típicos de Impedancia de Motores y Capacidad para ser usados cuando el valor exacto es desconocido. IEEE Std 141-1986

Tipo de Máquina	Equivalente
Motor de Inducción	1 HP = 1 KVA
Motor Sincrónico FP =0.8	1 HP = 1 KVA
Motor Sincrónico FP=1.0	1 HP = 0.8 KVA
Tipo de Motor	X''_d
Motores Sincrónicos	
2- 6 polos	0.15
8 - 14 polos	0.20
16 polos o más	0.28
Grandes motores individuales de inducción, usualmente de medio voltaje	0.167
Todos los otros, 50 HP o más	0.167
Todos menores a 50 HP, usualmente de bajo voltaje	0.167

Nota: La Impedancia de los motores esta dada en por unidad, en la base de potencia de los KVA del motor.

Tabla 2.5. Valores Típicos de Reactancias de Máquinas Síncronas

<i>Clase de máquina</i>	X_d (no saturado)	X_q (corriente nominal)	X'_d (voltaje nominal)	X''_d (voltaje nominal)	X_2 (corriente nominal)	X_0 (corriente nominal)
Turbogenerador de dos polos	1.20 0.95-1.45	1.16 0.92-1.42	0.15 0.12-0.21	0.09 0.07-0.14	= X''_d	0.03 0.01-0.08
Turbogenerador de cuatro polos	1.20 1.00-1.45	1.16 0.92-1.42	0.23 0.20-0.28	0.14 0.12-0.17	= X''_d	0.08 0.05-0.14
Generadores y Motores de polos salientes (con arrollado amortiguadores)	1.25 0.60-1.50	0.70 0.40-0.80	0.30 0.20-0.50	0.20 0.13-0.32	0.20 0.13-0.32	0.18 0.03-0.23
Generadores de polos salientes (sin arrollado amortiguadores)	1.25 0.60-1.50	0.70 0.40-0.80	0.30 0.20-0.50	0.30 0.20-0.50	0.48 0.35-0.65	0.10 0.03-0.24
Condensadores síncronos (enfriamiento por aire)	1.85 1.25-2.20	1.15 0.95-1.30	0.40 0.30-0.50	0.27 0.19-0.30	0.26 0.15-0.40	0.12 0.025-0.15
Condensadores síncronos (enfriamiento por hidrogeno a 0.5 PSI por KVA nominal)	2.20 1.50-2.65	1.35 1.10-1.55	0.48 0.36-0.60	0.32 0.23-0.36	0.31 0.22-0.48	0.14 0.030-0.18

Fuente : Westinghouse Electric CO. (1964) *Electrical Transmission and Distribution Reference Book*, Pittsburg, EEUU

Tabla 2.6. Valores Típico de Reactancias en por unidad para Máquinas Rotativas (50Hz)

<i>Tipo</i>	<i>MVA</i>	<i>MW</i>	<i>Tensión KV</i>	X''_d	X'_d	X_d	X_2	X_0	<i>SCR</i>
Turboalternador	75	60	11.8	12.5	17.5	201	13.5	6.7	0.55
	125	100	13.8	20.0	28.0	206	22.4	9.4	0.58
	324	275	16	16.0	21.5	260	18.0	6.0	0.40
	353	300	18.5	19.0	25.5	265	19.0	11.0	0.40
	588	500	22	20.5	28.0	207	26.0	15.0	0.40
	776	660	23	23.0	28.0	207	26.0	15.0	0.50
Turboalternador con turbina a gas	70	56	11.8	10.0	14.0	175	13.0	5.0	0.68
	87	70	11.8	14.0	19.0	195	16.0	7.5	0.55
Generador de polos salientes sin arrollado amortiguador			11	22.0	33.0	110	22.0	6.0	

Fuente: *The electric council (1969). Power System Protection, Vol. 1. Mc Donald and Co.*

Tabla 2.7. Valores Típicos de Reactancias de Cortocircuito de Transformadores de Potencia de Dos Arrollados

Tensión Nominal de los arrollados		Impedancia en por ciento			
Alta Tensión	Baja Tensión	Clase Enfriamiento: OA, OW, OA/FA, OA/FA/FOA		Clase de enfriamiento: FOA, FOW, OA/FA/FOA	
		Min	Max	Min	Max
15	15	4.5	7.0	6.75	10.5
25	15	5.5	6.0	8.25	12.0
34.5	15	6.0	8.0	9.0	12.0
	25	6.5	9.0	9.75	13.5
46	25	6.5	9.0	9.75	13.5
	34.5	7.0	10.0	10.5	15.0
69	34.5	7.0	10.0	10.5	15.0
92	34.5	7.5	10.5	11.25	15.75
	69	8.5	12.5	12.75	18.75
115	34.5	8.0	12.0	12.0	18.0
	69	9.0	14.0	13.5	21.0
	92	10.0	15.0	15.0	23.25
138	34.5	8.5	13.0	12.75	19.5
	69	9.5	15.0	14.25	22.5
	115	10.5	17.0	15.75	25.5
161	46	9.5	15.0	13.5	21.0
	92	10.5	16.0	15.75	24.0
196	138	11.5	18.0	17.25	27.0
	46	10.0	15.0	15.0	22.5
	92	11.5	17.0	17.25	25.5
230	161	12.5	19.0	18.75	28.5
	46	11.0	16.0	16.5	24.0
	92	12.5	18.0	18.75	27.0
	161	14.0	20.0	21.0	30.0

Fuente: Westinghouse Electric (1964). *Electrical Transmission and Distribution Reference Book*

2.5 Transformadores de Potencia

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*).

Sea el número de vueltas del devanado primario n_1 , y el número de vueltas del secundario n_2 . Asumiendo que el flujo de campo magnético en el núcleo atraviesa a ambas bobinas y es una función sinusoidal del tiempo.

$$\phi = \phi_{\max} \sin \omega t \quad (2)$$

Entonces el voltaje inducido en el bobinado primario en algún instante de tiempo por el flujo es:

$$E_p = -n_1 \frac{d\phi}{dt} \times 10^{-8} \quad (3)$$

$$E_p = -n_1 \omega \phi_{\max} \cos \omega t \times 10^{-8} \quad (4)$$

donde:

$$\omega = 2\pi f$$

$$E_p = -2\pi f n_1 \phi_{\max} \cos \omega t \times 10^{-8} \quad (5)$$

y el valor RMS de este voltaje es :

$$E_p = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} n_1 \phi_{\max} \times 10^{-8} \quad (6)$$

$$E_p = 4.44 f n_1 A B_{\max} \times 10^{-8} \quad (7)$$

donde:

f : Frecuencia en ciclos por segundo

A : Área de la sección transversal del circuito magnético en centímetros cuadrados

B_{\max} : Máxima densidad de flujo en el núcleo en línea por centímetro cuadrado.

Similarmente, el voltaje RMS inducido en el secundario por el flujo viene dado por:

$$E_s = 4.44 f n_2 A B_{\max} \times 10^{-8} \quad (8)$$

Entonces es evidente que un flujo sinusoidal que interactúa con las bobinas también produce una tensión sinusoidal la cual atrasa al flujo en 90° eléctricos.

Considerando que el bobinado secundario se encuentra en abierto, mientras se aplica un voltaje sinusoidal al bobinado primario. La corriente I_m , que fluye por el bobinado primario, es la llamada corriente de excitación, y esta establece el flujo alternante alrededor de los bobinados.

El circuito equivalente de un transformador, puede adoptar muy distintas y variadas formas, de acuerdo a los requerimientos de la situación a simular; pasando desde donde el artificio matemático del transformador ideal³ es utilizado hasta el modelo real exacto.

El circuito equivalente real exacto de un transformador de potencia de dos devanados considera los efectos de la resistencia de los devanados, las dispersiones de flujo y las corrientes de excitación. El efecto del circuito primario es simulado atribuyendo a dicho devanado una reactancia de dispersión X_{l1} , y una resistencia en serie r_1 para simular la caída de tensión en la resistencia efectiva del bobinado ($Z_1 = r_1 + jX_{l1}$). La corriente de excitación se toma en cuenta por la colocación de una resistencia no inductiva de conductancia g_m , en paralelo con una inductancia sin pérdida de susceptancia b_m (esta rama Shunt indica la rama de excitación de la máquina Z_m). El circuito secundario es simulado al igual que el primario, una resistencia r_2 , que simula la caída de tensión debido a la resistencia del cobre del devanado en serie con la reactancia de dispersión secundaria X_{l2} ($Z_2 = r_2 + jX_{l2}$).

El modelo antes expuesto, corresponde al circuito equivalente "T" por fase, exacto para un transformador de dos devanados; en el cual no se utiliza el artificio del transformador ideal. En esta representación, no hay modificación del nivel de tensión correspondiente a la transformación de tensión de los lados de alta y baja tensión del transformador real. La corriente en ambos extremos del circuito equivalente es idéntica si se

³ El transformador ideal es introducido para preservar la relación de voltaje y corriente entre los terminales del transformador al tiempo que aísla los dos arrollados. Este transformador ideal no tiene impedancia, y no requiere de corriente de excitación.

desprecia la corriente magnetizante. Esto se logra refiriendo apropiadamente mediante la aplicación de la relación e transformación todos los parámetros eléctricos a un mismo lado del transformador.

Si se consideran las condiciones instantáneas de tensión y corriente dados por las ecuaciones de acoplamiento, resulta:

$$E_p = r_1 I_p + L_1 \frac{dI_p}{dt} - M \frac{dI_s}{dt} \quad (9)$$

$$E_s = -r_2 I_s - L_2 \frac{dI_s}{dt} + M \frac{dI_p}{dt} \quad (10)$$

Donde r_1 y r_2 son respectivamente la resistencia efectiva de los arrollados primario y secundario; L_1 y L_2 son las autoinductancias del devanado primario y secundario; y M es la inductancia mutua entre los dos arrollados. Los coeficientes L_1 , L_2 y M no son constantes pero varían con la saturación del núcleo magnético. Bajo las expresiones anteriores la rama de magnetización puede ser escrita como:

$$Z_m = j\omega \frac{n_1}{n_2} M \quad (12)$$

Mientras que las impedancias resultan

$$Z_1 = r_1 + j\omega \left(L_1 - \frac{n_1}{n_2} M \right) \quad (13)$$

$$Z_2 = r_2 + j\omega \left(L_2 - \frac{n_2}{n_1} M \right) \quad (14)$$

Las impedancias Z_1 y Z_2 son componentes de la impedancia total que existe entre el primario y el secundario del transformador, resultando que la impedancia total del transformador es:

$$Z_{12} = Z_1 + \frac{1}{N^2} Z_2 \quad (15)$$

Siendo Z_{12} , definida como la impedancia total entre el arrollado primario y secundario medido en Ohmios, cuando por el primario se alimenta y por el secundario se produce un cortocircuito.

En la realidad, la impedancia característica del transformador de dos arrollados Z_{12} , se obtiene de un ensayo de cortocircuito, pero resulta imposible separar esta en dos partes, Z_1 asociada al primario y Z_2 al secundario.

Pero en los transformadores de dos arrollados de potencia, es común suponer:

$$Z_1 = \frac{1}{N^2} Z_2 = \frac{1}{2} Z_{12} \quad (16)$$

El mecanismo para determinar, experimentalmente la impedancia característica de un transformador es mediante el ensayo de cortocircuito, en el que se alimenta por el primario y se cortocircuita el secundario, cuidado que en este cortocircuito, en ningún momento se supere la potencia menor de los devanados en ensayo, ya que esto implicaría el daño permanente del mismo. Bajo esta concepción, algunos autores, afirman que la impedancia característica del transformador de dos devanados es simplemente, la caída de tensión que experimenta un transformador cuando en sus terminales acontece un cortocircuito.

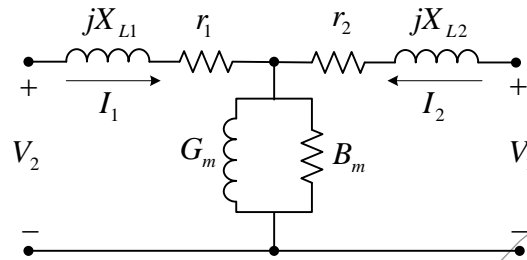


Fig. 2.6. Modelo Equivalente T, de un Transformador de dos Arrollados. Nota: Todas las impedancias están referidas a un solo lado

Tabla 2.8. Valores Típicos de Impedancia de Cortocircuito de Transformadores de Subestaciones primarias. Para Transformadores trifásicos de 501-10.000 KVA o Monofásico de 501 - 10.000 KVA

Lado de Alta, Tensión Nominal (Volt)	Impedancia en por ciento	
	Lado de baja, Tensión Nominal	
	2400 V y más	480 V ^(*)
2400 - 22.900	5.5	5.75
26.400 - 34.400	6.0	6.25
43.800	6.5	6.75
67.000	7.0	--

Fuente : ASA C57.12.10-1958 y NEMA TR-1-1962

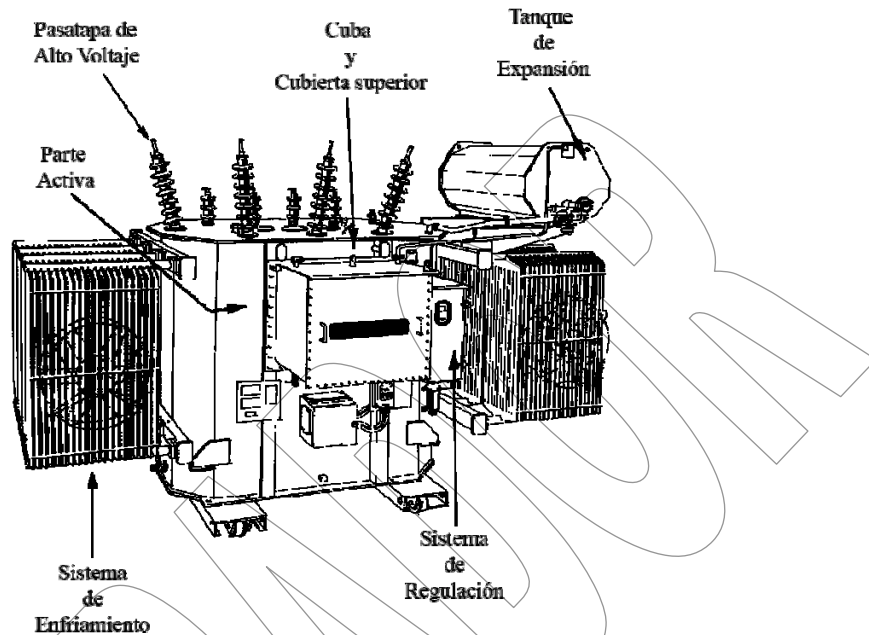
(*): En general para igual o menor a 600 V

Tabla 2.9. Valores típicos de impedancia de cortocircuito de transformadores en Subestaciones secundarias. Lado de alta: máximo 15 KV. Lado de baja: máximo 600 V

Capacidad Trifásica KVA	Normas NEMA Z en %	Rango de los fabricantes Z en %	Valor típico de X/R
112.5	2 Min	2.3 - 5.2	5
150	2 Min	2.7 - 5.1	5
225	2 Min	4.4 - 5.0	5.5
300	4.5 Min	4.5 - 6.0	6
400	--	4.5 - 6.0	6
500	4.5 Min	4.5 - 6.0	6
750	5.75 Min	5.75	7
1000	5.75 Min	5.75	8
2500	5.75 Min	5.75	9
2000	5.75 Min	5.75	12
2500	5.75 Min	5.75	12

Fuente : Ohlson, R. O. (1995). Procedure for Determining Short Circuit Values in Secondary Electrical Distribution System, IEEE

Fig. 2.7. Partes de un Transformador de Potencia



Los transformadores pueden ser clasificados a saber bajo los siguientes criterios:

- Forma de construcción
- Número de fases
- Tipos de refrigeración.

Los transformadores, pueden ser diferenciados según las características de construcción de su núcleo magnético. En el caso de una transformador monofásico (*single-phase*) este consiste de un núcleo único que provee un camino de circulación para el campo magnético (*Core form*). Las bobinas de alta y baja tensión son agrupadas todas en cada una de las columnas de este núcleo. Colocándose en las capas más centrales el bobinado de baja, mientras que el de alta se coloca sobre este.

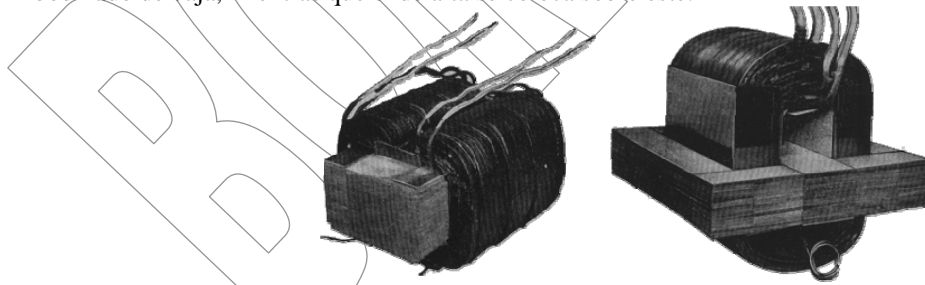


Fig. 2.8. Diseños de construcción del núcleo de transformadores, Tipo Core (Izquierda), Tipo Shell (Derecha)

La forma acorazado (*Shell Form*) para transformadores monofásicos consiste de todos los arrollados formados dentro de un simple anillo, con un núcleo magnético ensamblado para rodear cada lado de los discos de bobinas.

En el diseño de un transformador particular muchos son los factores a considerar, como el esfuerzo del aislamiento, el esfuerzo mecánico, la distribución del calor, peso y costos, deben conformar un balance preciso.

Un transformador de potencia trifásico puede ser establecido de dos tipos: por los usos de tres transformadores monofásicos, para conformar un *banco trifásico*, o por la construcción propia siendo una *unidad trifásica*.

La unidad trifásica posee la ventaja de su mayor eficiencia, menor tamaño, y menos costos comparados con un banco de igual capacidad construido por tres transformadores monofásicos.

Cuando tres unidades transformadoras monofásicos son usadas en un banco, es posible disponer de una cuarta unidad, la cual puede ser instalada en caso de que algunas de las unidades del banco falle. Esto requiere solo de una inversión adicional del 33% para proveer esta capacidad de reposición, mientras que un 100% de costos adicional debe ser hecho si se desea reemplazar una unidad trifásica fallada.

Como quiera que sea, los transformadores son los elementos que proveen más alta confiabilidad que los restantes elementos del sistema de potencia, por tanto no es una razón de mucho peso el disponer de una capacidad de reposición en el caso de los transformadores.

Cabe señalar que el transformador monofásico encuentra mucha acogida en los sistemas de transmisión a muy altas tensiones. Esto obedece a la imposibilidad de transportar unidades trifásicas de elevada potencia (más de 1000 MVA). En Venezuela, en el sistema trifásico de 765 kV de la empresa EDELCA, demanda potencias tan elevadas que los transformadores que a los efectos de transporte hasta el sitio final sólo es factible llevar unidades monofásicas para construir un banco. En la realidad en el Sistema Interconectado Venezolano, se encuentran ubicados autotransformadores de tres devanados con delta terciaria.

Los transformadores requieren de mecanismos refrigerantes para sus partes energizadas, por ello, se disponen de diferentes mecanismos para ello.

- *OA Inmerso en aceite, y auto refrigerado (Oil Immersed Self-Cooled)*: En este tipo de transformador, el aceite dieléctrico circula por convección natural dentro del tanque pudiendo ser de paredes lisas, corrugadas, con tuberías integradas o de paredes separables. El tanque de paredes lisas es usado para transformadores pequeños de distribución, pero esto debido a que las pérdidas se incrementan más rápidamente que el tamaño de las paredes del tanque por aumentos de capacidad, un transformador de tanque liso mayor a 50 KVA debe ser anormalmente grande para proveer suficiente superficie de refrigeración. El tanque integrado tubular es usado por encima de los 3MVA y en algunos casos para potencias mayores. Por encima de 3 MVA, los radiadores de paredes separables son usualmente los utilizados. El transformador OA es el tipo básico, y poseen un precio moderado.
- *OA/OF Sumergido en Aceite Auto Refrigerado/Ventilación Forzada (Oil -Immersed Self – Cooled / Forced – Air - Cooled)*: Este tipo de transformador es básicamente una unidad OA con la incorporación de ventiladores para incrementar la rapidez de transferencia de calor a las superficies de refrigeración, incrementando la potencia de salida del transformador. El transformador OA/FA es aplicable en situaciones que requieren de picos de corto tiempo de carga que son de ocurrencia recurrente, sin que se afecte las expectativas de tiempo de vida del transformador. Este transformador puede ser adquirido con ventiladores previamente instalados o estos pueden ser incorporado después. La más alta capacidad que se puede obtener de un transformador utilizando ventiladores depende de la capacidad sin refrigeración del mismo.

Para 2500 KVA (OA) y menos:

$$KVA(FA) = 1.15 \times KVA(OA) \quad (17)$$

Para 2501 KVA a 9999 KVA (OA) monofásico y 12 MVA (OA) trifásico:

$$KVA(FA) = 1.25 \times KVA(OA) \quad (18)$$

Para 10 MVA (OA) monofásico y 12MVA (OA) trifásico y por encima:

$$KVA(FA) = 1.333 \times KVA(OA) \quad (19)$$

- *OA/FOA/FOA Sumergido en Aceite Auto – Refrigerado / Aceite- Forzado - Aire Forzado Refrigerado/Aceite Forzado- Aire Forzado Refrigerado. (Oil - Immersed Self –Cooled / Forced-Oil Forced - Air Cooled / Forced - Oil Forced- Air Cooled):* La potencia de un transformador sumergido en aceite puede ser incrementado de su valor OA mediante la incorporación de bombas de aceite y ventiladores. Como los transformadores que son normalmente construido en el rango de 10 MVA (OA) monofásico o 12 MVA (OA) trifásico o más. El incremento de potencia puede ser en dos pasos 1.333 y 1.667 veces de la potencia OA definida. En estos transformadores equipos de control son responsables de la temperatura del aceite y normalmente encienden los ventiladores y las bombas en una secuencia seleccionado según los aumentos de carga.
- *FOA Sumergido en Aceite con Aceite forzado Refrigerado con Aire Forzado Refrigerado (Oil - Immersed Forced – Oil - Cooled With Forced - Air Cooler):* Este tipo de transformador es destinado para usarse solo cuando opera tanto bombas de aceite como ventiladores, bajo esta condición algunos aumentos de carga de apenas unos Kva puede ser absorbidos. Algunos diseños son capaces de soportar la corriente de excitación sin ventiladores y bombas en operación, pero esto no es universalmente cierto. La transferencia de calor del aceite a el aire es acompañado por intercambiadores externos de calor.
- *OW Sumergido en Aceite Refrigerado por Agua (Oil Immersed Water - Cooled):* En este tipo de transformador el agua utilizada como refrigerante circula a través de las bobinas en tubos las cuales están en contacto con el aceite dieléctrico del transformador. El aceite fluye alrededor de estos tubos y las bobinas por convección natural, de esta forma se efectúa la transferencia de calor al agua. Este tipo no es incluido dentro de los auto refrigerados.
- *FOW Sumergido en Aceite Forzado con Agua Forzada Refrigerada (Oil Immersed Forced – Oil - Cooled With Forced - Water Cooler):* Intercambiadores de calor externos para aceite y el agua son usados en este tipo de unidad para transferir el calor del aceite al agua refrigerante, este transformador es parecido al tipo FOA.
- *AA Tipo Seco Auto Refrigerado (Dry Type Self - Cooled):* El transformador tipo seco, es posible para tensiones menores a 15KV y por debajo, no contiene aceite, u otro líquido para ayudar al aislamiento y refrigerarlo. El aire es el medio el cual circula alrededor del núcleo y las bobinas, el cual circula libremente por convección.
- *AFA Tipo Seco Aire Forzado Refrigerado (Dry Type Self Cooled / Forced - Air Cooled):* Este tipo de transformador posee un valor fijo de potencia, es basado en la circulación de aire forzado a través del transformador por ventiladores.
- *AA/FA Tipo seco Auto Refrigerado/Aire Forzado Refrigerado (Dry Type Self – Cooled / Forced - Air Cooled):* Este tipo de transformador posee una capacidad basada en la convección natural del aire y una segunda basada en la circulación forzada de aire por ventiladores o sopladores

Los transformadores trifásicos se suelen agrupar en diferentes categorías, de acuerdo a la conexión de sus devanados. La norma VDE 0532, se refiere a los grupos con cifras como 0, 5, 6 y 11. La cifra indica en sí el múltiplo de 30° con el cual el arrollado de alta se encuentra desfasado respecto al de baja tensión.

$$V_{Low} = V_{High} \left(\frac{1}{n} \right) e^{-jk*30^\circ} \quad (20)$$

En vista de que el número 6, no contempla un giro o defasaje, sino tan solo un cambio de signo, se suelen hablar de dos grupos de conexión, o grupos vectoriales:

- 0 y 6... Grupo de conexión normal.
- 5 y 11... Grupo de conexión giratorio.

Para que la potencia transmitida por el transformador se mantenga en equilibrio, tanto el lado de alta con en el de baja tensión, es menester que el giro o defasaje que sufra la tensión sea también válido para la corriente.

Los transformadores de potencia mas utilizados en alta tensión pueden agruparse de la siguiente manera:

- *Yy0⁴ para Distribución.* El neutro puede ser continuamente cargado con 10% de la tensión nominal y hasta 30% por espacio de 2 horas máximo.
- *Yy0 Compensado.* El devanado de compensación permite una carga continua del neutro con la intensidad de corriente de régimen. Se utiliza en los transformadores que sirven para el acoplamiento de la red.
- *Yd5 para máquina.* El devanado en delta se diseña para la máquina dinámica. El neutro se puede cargar continuamente con la corriente nominal y permite la conexión de una bobina Petersen. Se utiliza en centrales y patios de transmisión.
- *Yz5 para distribución.* Hasta 250 KVA como transformador de servicios auxiliares y para distribución. El neutro se puede cargar con la intensidad de corriente nominal.
- *Dy5 para distribución.* Muy utilizado a partir de 400 KVA en sistemas industriales. El neutro se puede cargar con la intensidad de corriente nominal.

En los sistemas de potencia interconectados se observa con frecuencia que los transformadores se encuentran conectados en paralelo. Esto implica que cuando al menos dos de los niveles de tensión de una unidad están conectados en paralelo con los niveles correspondientes a otra unidad. Para que la operación en paralelo de estos transformadores se lleve a cabo sin que se produzca la circulación de corrientes compensación con elevadas magnitudes, se deben cumplir las siguientes reglas:

- Los grupos de conexión o grupos vectoriales tienen que ser iguales entre sí. La única excepción, viene dada por los grupos 5 y 11, pues ambos son compatibles.
- La relación de transformación deben ser la misma, de manera que las tensiones en el lado de alta y baja tensión sean iguales entre sí.
- La tensión de cortocircuito de las unidades que se conectarán en paralelo debería ser la misma, o en su defecto, no exceder al 10% de tolerancia.
- La relación existente entre las potencias nominales de las unidades involucradas debe ser inferior a 3:1.

Los transformadores son máquinas eléctricas sumamente apasionantes, que encuentran un sin número de aplicaciones dentro de los sistemas de potencia, de hecho el transformador de potencia de dos y tres devanados son las máquinas de mayor uso dentro del sistema de potencia; aunque también existen los autotransformadores de potencia, transformadores de aterramiento, etc.

⁴ La conexión Yy0, corresponde al primario en estrella, y el secundario también, pero que se le conecta una carga bifásica entre dos de las líneas de la estrella de baja

2.6 Líneas de Transmisión

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 equilátralmente, e incluso sin transposición, la influencia de la asimetría es pequeña, y se pueden considerar como elementos trifásicos equilibrados.

La clasificación de las líneas de transmisión se realiza según su longitud. Las *líneas cortas* aéreas por lo general son de longitud menor a 50 millas (80 Km.) su modelo equivalente consiste de la resistencia e inductancias en serie, en estas líneas se desprecia debido a que la susceptancia capacitiva total es muy pequeña.

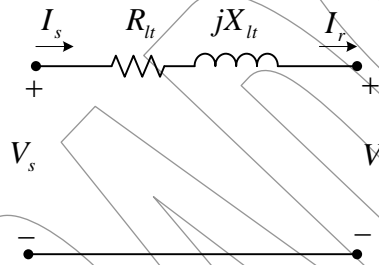


Fig. 2.9. Modelo circuital para una línea de transmisión corta

En las líneas cortas se cumple que la corriente de envío I_s , es igual a la corriente de recepción I_r , debido a que no existe el fenómeno de la capacitancia derivación que pudiese modificar las corrientes. La relación entre la tensión en el extremo de envío V_s y el de recepción V_r resulta:

$$V_s = (R_{LT} + jX_{LT})I_s + V_r \quad (21)$$

Cuando la longitud de las líneas aumenta de 50 a 150 millas aproximadamente (80-240 Km.) se trata de *líneas medias*, la influencia de la susceptancia se hace presente, por lo cual en el modelo equivalente se debe considerar la capacitancia total, además de la inductancia y la resistencia, pero todos bajo el concepto de parámetros concentrados. A menudo se utiliza el circuito Π , en donde se representa la admitancia total Y debida a la capacitancia total C de la línea debida en dos partes iguales y colocadas en ambos extremos de la línea.

La relación entre los voltajes y corrientes en ambos extremos de la línea son:

$$V_s = \left(Z \frac{Y}{2} + 1 \right) V_r + I_r \quad (22)$$

$$I_s = \left(1 + Z \frac{Y}{4} \right) V_r + I_r \left(1 + Z \frac{Y}{2} \right) \quad (23)$$

Las líneas de longitud superior a 200 millas (320 Km.), o *líneas largas*, el cálculo del modelo equivalente debe ser más preciso debido a que los fenómenos asociados con estas son muy complejos, por lo cual se consideran todos los parámetros de manera distribuida.

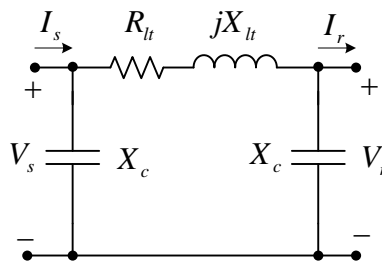


Figura 1. Modelo equivalente Π , para una línea de transmisión media

El sistema de transmisión venezolano, posee tres niveles básicos de tensión: 230, 400 y 765 kV.

El sistema de transmisión de 765 kV venezolano, esta compuesto por líneas que utilizan torres de disposición horizontal, donde se colocan las fases en haz de conductores. Cada fase consta de cuatro conductores de 1300 mcm ACSR 18/19, que conforman un cuadrado de 45 cm. por lado y además dos cables de guarda de Allumoweld 7#8. Siendo sus parámetros:

- Resistencia Propia: 0.0147 Ω /Km.
- Reactancia Propia: 0.3418 Ω /Km.
- Susceptancia Propia: 4.8819 x 10⁻⁶ Mho/Km.

Tabla 2.10. Valores Típicos de impedancias de líneas de transmisión aéreas

Voltaje (kV)	Calibre del Conductor MCM o AWG	Resistencia Serie	Reactancia Serie	X/R	Reactancia Shunt
69	2/0 cu	0.299	0.487	1.63	0.293
	336.4 ACSR	0.190	0.461	2.43	0.282
	2/0 Cu	0.188	0.504	2.68	0.306
	336.4	0.190	0.479	2.52	0.293
	336.4 ACSR	0.190	0.502	2.64	0.308
115	336.4 ACSR	0.190	0.474	2.49	0.290
	4/0 Cu	0.188	0.519	2.75	0.315
	336.4 ACSR	0.190	0.494	2.60	0.303
	336.4 ACSR	0.190	0.513	2.70	0.315
138	397.5 ACSR	0.161	0.474	2.95	0.291
	250 Cu	0.160	0.517	3.23	0.314
	397.5 ACSR	0.161	0.488	3.03	0.300
	397.5 ACSR	0.161	0.510	3.17	0.314
161	397.5 ACSR	0.161	0.484	3.01	0.297
	250 Cu	0.160	0.521	3.26	0.317
	397.5 ACSR	0.161	0.492	3.06	0.303
	397.5 ACSR	0.161	0.513	3.19	0.316
230	795 ACSR	0.0800	0.477	5.97	0.293
	500 Cu	0.0783	0.462	5.90	0.290
	795 ACSR	0.0800	0.487	6.09	0.299
	795 ACSR	0.0800	0.503	6.29	0.309
Prom.			0.493		0.302

(1): Voltaje Nominal

Fuente: Lazar, I. (1969). Calculating Industrial Short Circuit Current. Power Magazine

2.7 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.

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.

Existen dos modelos equivalentes para simular el comportamiento de las cargas estáticas; modelo serie y modelo paralelo.

En general estos modelos constan de una resistencia que absorbe la potencia activa, y una reactancia que consume potencia reactiva (reactiva capacitiva o inductiva, según sea el caso del factor de potencia que se presente). Ahora bien, se debe hacer la acotación que esta es la idealización de una carga cuya demanda y factor de potencia es constante en el tiempo.

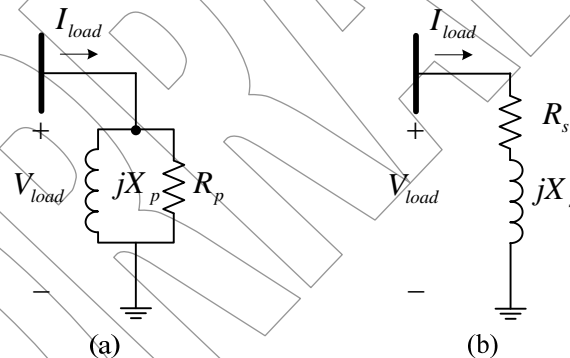


Figura 2. Modelo de Carga Estática. (a) Modelo paralelo (b) Modelo serie

Entre las cargas estáticas para análisis de cortocircuito, se pueden considerar, los equipos de iluminación y calefacción de naturaleza resistiva; además de aquellos equipos que poseen componentes de estado sólido, tal como motores de corriente continua, o motores de inducción pero con variadores de velocidad.

Las cargas dinámicas por su parte, son aquellas que ante eventos de falla, pueden contribuir con corriente al cortocircuito, en este tipo de carga recaen las máquinas giratorias del tipo sincrónica y de inducción (ya sea de arranque directo o de cambio de velocidad, pero que no incluyan como alimentación dispositivos de estado sólido).

2.8 Diagramas de Impedancias 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*.

Este diagrama de impedancias, permite el cálculo 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.

La construcción de los diagramas de impedancias debe ser cuidadosa; especialmente en el caso de 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); así que se evidencia la dependencia del valor de la impedancia de un sistema del lado de la transformador al que se refiera.

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 construidos 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.

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.

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

Los diagramas de impedancias y de reactancias, algunas veces son denominados diagramas de secuencia positiva, puesto que representan impedancias para las corrientes equilibradas de un sistema trifásico simétrico.

Ejemplo 2.1

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. Este sistema consta de un generador, dos transformadores, una línea de transmisión y una carga estática (Ver Figura 2.10).

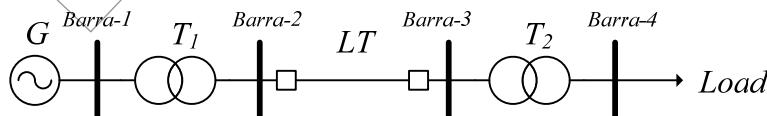


Fig. 2.10. Sistema de Potencia Radial Simple

Si se procede a sustituir cada elemento por su modelo equivalente, se obtiene el diagrama de impedancias Ver Figura 2.11.

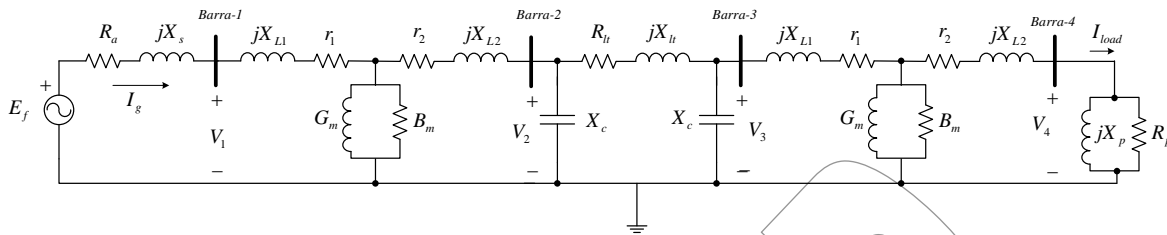


Fig. 2.11. Diagrama de Impedancias del Sistema Mostrado

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:

1. Se desprecia la resistencia de los generadores, transformadores, líneas de transmisión, debido a que se considera muy pequeña comparada con la parte reactiva.
2. 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.
3. Se obvia el efecto de la capacitancia en las líneas de transmisión.
4. No se considera el valor de la carga estática

Se construye finalmente el diagrama de reactancias del sistema. (Ver Figura 2.12)

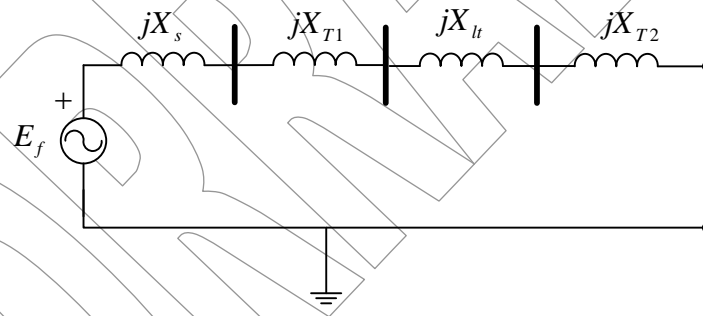
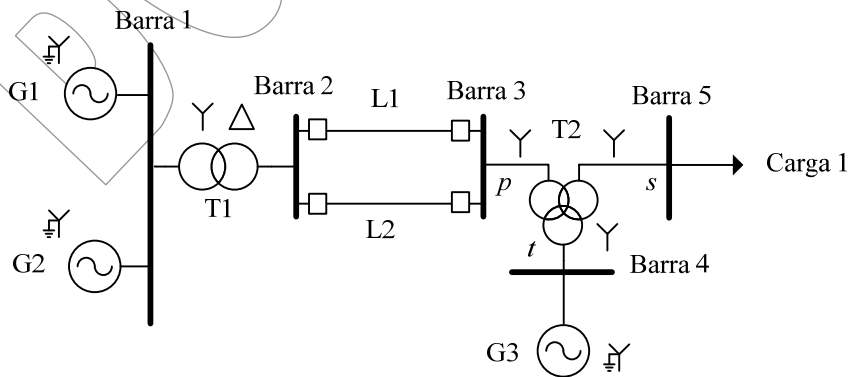


Fig. 2.12. Diagrama de Reactancias del Ejemplo

Ejemplo 2.2

Considere el diagrama unificar mostrado en la siguiente Figura.



Datos del Sistema

G1: 13.8 kV, 5 MVA, $X_d = 8 \Omega$

G1: 13.8 kV, 5 MVA, $X_d = 9 \Omega$
 G2: 10 kV, 5 MVA, $X_d = 9 \Omega$
 T1: 13.8/115 kV, 10 MVA, $X_{tl} = 6 \Omega$ (Lado de baja), unidad trifásica
 T2: 115/69/10 kV, 50/50/10 MVA, $X_p = 6 \Omega$, $X_s = 3 \Omega$, $X_t = 2 \Omega$, (todos los valores están referidos al terciario) unidad trifásica.
 L1: 100 km. $X_{L1} = 0.9 \Omega/\text{km}$.
 L2: 110 km. $X_{L2} = 0.7 \Omega/\text{km}$.
 Carga 1: 5MW, 5MVAR, 69 kV en Delta.

Fig. 2.13. Diagrama Unifilar Ejemplo 2.2

Construir el diagrama de impedancias en unidades reales, Ohmios, referido a las líneas de transmisión. (Lado de alta de los transformadores).

Resolución

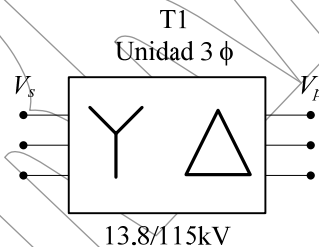
Se desea construir el diagrama de impedancia referido a las líneas de transmisión, de tal modo que todas las impedancias que estén en un lado diferente al especificado, debe ser modificada por la adecuada relación de transformación.

Para las líneas de transmisión, están en la zona donde se desea expresar lo valores, de modo que directamente se pueden calcular las impedancias. Se cumple:

$$X_{L1} = 100 \text{ km} \times 0.9 \frac{\Omega}{\text{km}} = 90 \Omega$$

$$X_{L2} = 110 \text{ km} \times 0.7 \frac{\Omega}{\text{km}} = 77 \Omega$$

Para los generadores G1 y G2, se ve en el unifilar que están conectados al sistema de transmisión por medio de un transformador elevador, T1, de modo que esas impedancias deben ser referidas al sistema de transmisión por la adecuada relación de transformación.



Se conoce por teoría de transformadores de potencia de dos devanados, que la máquina satisface:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p} = \frac{Z_p I_p}{Z_s I_s} \rightarrow Z_p = Z_s \frac{V_p^2}{V_s^2}$$

$$Z_p = Z_s \frac{V_p^2}{V_s^2}$$

En el generador G1, se debe emplear la relación de transformación adecuada de T1:

$$X_{G1} = 9 \Omega \times \left(\frac{115 \text{ kV}}{13.8 \text{ kV}} \right)^2$$

$$X_{G1} = 555.5 \Omega \text{ (referido al sistema de transmisión)}$$

En el generador G2, se debe emplear la relación de transformación adecuada de T1:

$$X_{G2} = 9 \Omega \times \left(\frac{115 \text{ kV}}{13.8 \text{ kV}} \right)^2$$

$$X_{G2} = 625\Omega \text{ (referido al sistema de transmisión)}$$

En el transformador T1, la reactancia esta dada para el lado de baja del transformador, de tal modo que debe ser llevada al lado de alta, es decir referirla al sistema de transmisión.

$$X_{T1} = 6\Omega \times \left(\frac{115kV}{13.8kV} \right)^2$$

$$X_{T1} = 416.6\Omega \text{ (referido al sistema de transmisión)}$$

En el generador G3, se debe emplear la relación de transformación adecuada de T2:

$$X_{G3} = 9\Omega \times \left(\frac{115kV}{10kV} \right)^2$$

$$X_{G3} = 1090.25\Omega \text{ (referido al sistema de transmisión)}$$

Para el transformador de tres devanados, T2:

$$X_p = 6\Omega \times \left(\frac{115kV}{10kV} \right)^2$$

$$X_p = 793.5\Omega \text{ (referido al sistema de transmisión)}$$

$$X_s = 3\Omega \times \left(\frac{115kV}{10kV} \right)^2$$

$$X_s = 396.75\Omega \text{ (referido al sistema de transmisión)}$$

$$X_t = 2\Omega \times \left(\frac{115kV}{10kV} \right)^2$$

$$X_t = 264.5\Omega \text{ (referido al sistema de transmisión)}$$

Para la Carga 1, se debe determinar inicialmente la impedancia.

$$Z_{Load} = \frac{|V_{Load}|^2}{S_{load}^*}$$

De tal modo:

$$Z_{Cargal} = \frac{|69kV|^2}{5\sqrt{2} \angle -45MVA}$$

$$Z_{Cargal} = 673.30 \angle 45^\circ \Omega = (476.1 + 476.1j)\Omega \text{ (referido al secundario de T2)}$$

La Carga 1 debe ser referida al sistema de transmisión por ello se debe emplear la adecuada relación de transformación.

$$Z_{Cargal} = (476.1 + 476.1j)\Omega \times \left(\frac{115kV}{69kV} \right)^2$$

$$Z_{Cargal} = (1870.29 + 1870.29j)\Omega \text{ (referido al sistema de transmisión)}$$

Finalmente el diagrama de impedancias en ohmios, referido al sistema de transmisión, se muestra en la siguiente figura.

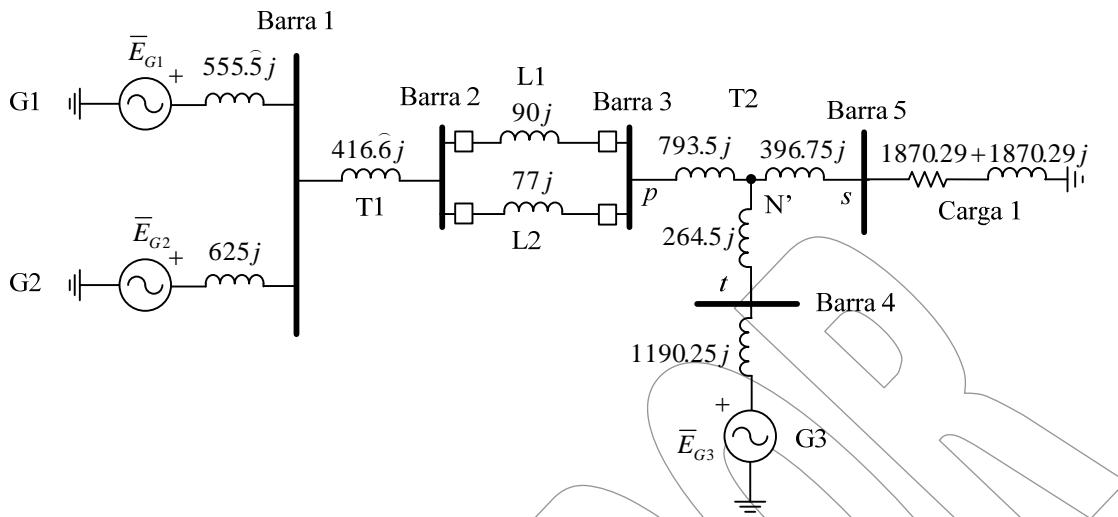


Fig. 2.14. Diagrama de Impedancias del Ejemplo 2.2

Es importante hacer notar que el punto N', es un nodo ficticio que se agrega como consecuencia del modelo del transformador de tres devanados, se trata de un nodo que físicamente no existe, solo para propósitos de calculo.

En este caso el diagrama de reactancia resulta muy simple ya que no se considera el valor de la carga estática, de tal modo que el respectivo diagrama se muestra en la Figura siguiente.

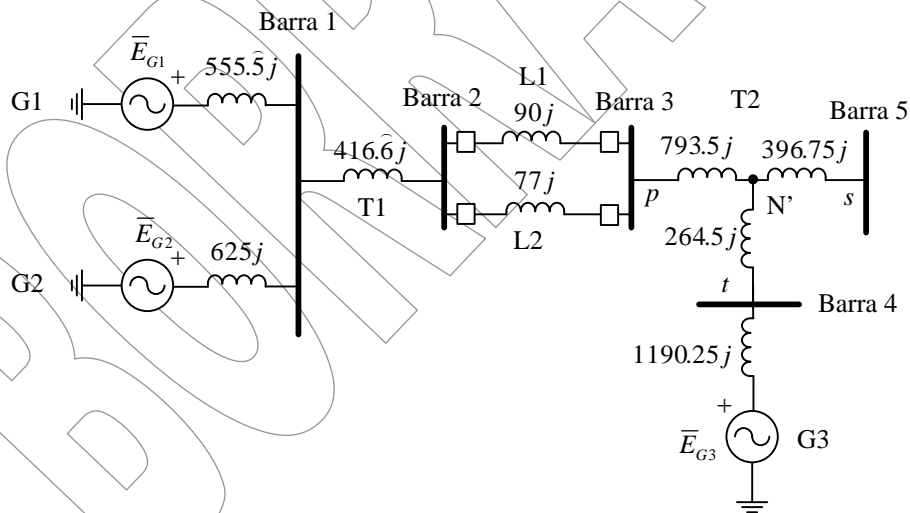
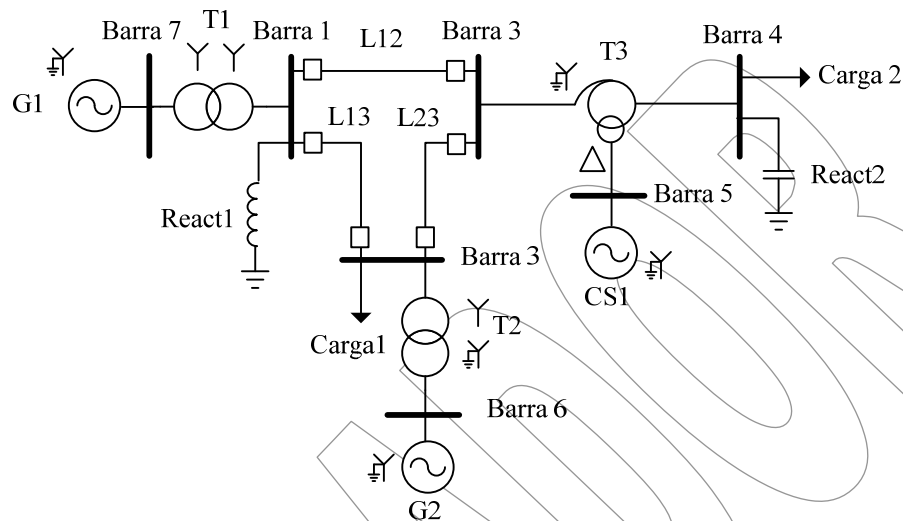


Fig. 2.15. Diagrama de Reactancias del Ejemplo 2.2.

Ejercicio Propuesto 2.1

Construir el diagrama de impedancias en Ohmios, referido al sistema de transmisión para el sistema de potencia mostrado en el diagrama unifilar de la siguiente Figura.

*Datos del Sistema*

G1: 20 MVA, 12 kV, $X_{d1} = 9 \Omega$, YN

G2: 20 MVA, 10 kV, $X_{d2} = 8 \Omega$, YN

CS1: 10 MVA, 13.8 kV, $X_{d3} = 9 \Omega$, YN

T1: 20 MVA, 100/5 kV, $X_{l1} = 10 \Omega$ (Lado de baja), Banco Trifásico

T2: 20 MVA, 115/69 kV, $X_{l2} = 6 \Omega$ (Lado de baja), Yyn, Unidad Trifásica

T3: 30/30/10 MVA, 100/30/20 kV, $X_{ps} = 8 \Omega$, $X_{pt} = 2 \Omega$, $X_{st} = 5 \Omega$ YNd, Unidad Trifásica

Líneas de Transmisión, $R = 0.1 \Omega/\text{km}$, $X = 0.4 \Omega/\text{km}$. L12: 80 km, L13: 80 km, L23: 60 km

Carga 1: 20 MW, 10MVAR, a 115 kV, YN

Carga 2: 10 MW, 10.MVAR, a 34.5 kV, YN

React1: 100 MVAR, 66.395 kV, Banco Trifásico, YN

React2: 100 MVAR, 19.918 kV, Banco Trifásico, YN

Fig. 2.16. Diagrama Unifilar Ejercicio Propuesto 2.1