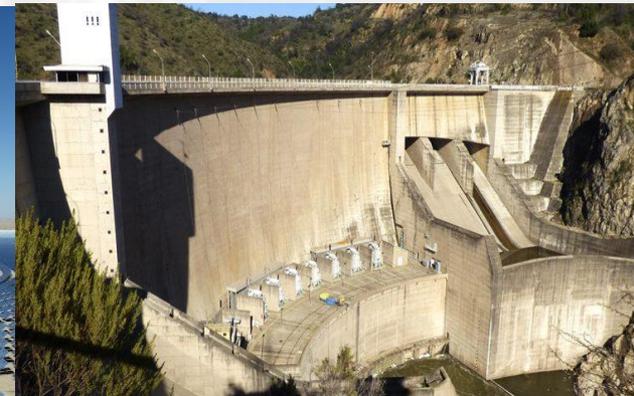


Unidad 1

Fundamentos en sistemas eléctricos de potencia

Parte III

Emerson Madrid Lorca
Ingeniero Civil Electricista, U. de Chile
emerson.madrid@utalca.cl



Objetivos de la Unidad 1

- Identificar los aspectos principales asociados al sistema eléctrico chileno.
- Identificar los principales elementos de un sistema eléctrico de potencia y la simbología asociada a los mismos.
- Distinguir las distintas topologías de redes eléctricas de potencia, mediante el análisis de sus diagramas unilineales.
- Utilizar el sistema en por unidad en los sistemas eléctricos de potencia.**

EL SISTEMA EN "POR UNIDAD"

Definición:

Es un sistema adimensional en que se expresan cantidades eléctricas: V, I, Z, S, etc., como una proporción de magnitudes base o referencias apropiadas.

$$\text{Valor (p.u.)} = \text{Valor } [^{\circ}/1] = \frac{\text{Valor real}}{\text{Valor base}}$$

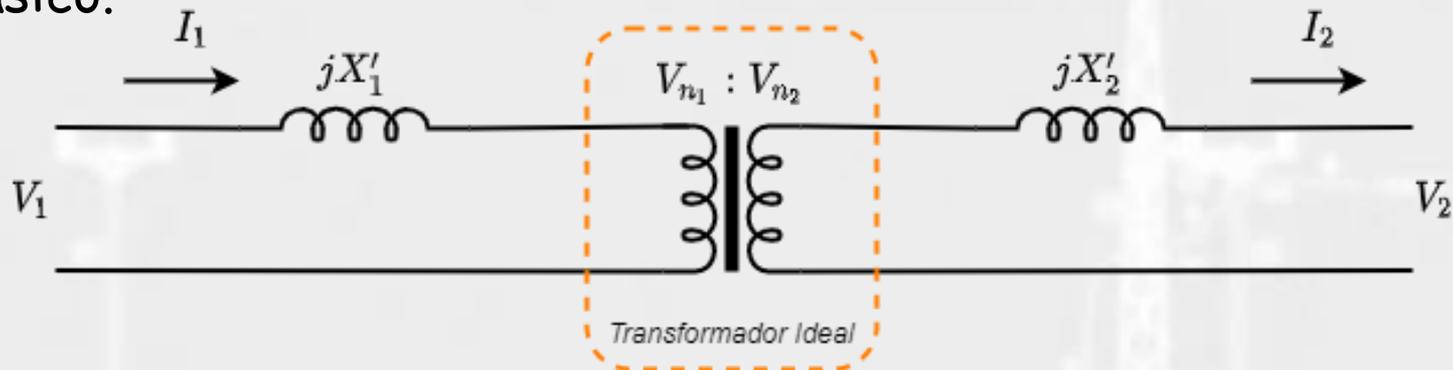
Parece una complicación innecesaria... ipero es ventajoso!

EL SISTEMA EN "POR UNIDAD"

- **Facilita la detección de valores erróneos:** debido a que las magnitudes eléctricas se expresan como una proporción de valores base, si este se escoge de manera conveniente (valores nominales, por ejemplo), el valor en p.u. indica una proporción con respecto al valor nominal.
- **Simplifica el trabajo a través de distintos niveles de tensión,** debido a que en este modelo equivalente no es necesario considerar la relación de transformación si se escoge en forma adecuada los voltajes base.
- **Evita errores por considerar voltajes fase - fase y fase - neutro,** ya que ambos valores son numéricamente idénticos si se expresan en p.u., considerando que los valores base deben respetar la relación de tensiones fase - fase y fase - neutro.

TRANSFORMADOR MONOFÁSICO EN P.U. (I)

Se considera el circuito equivalente simplificado de un transformador monofásico.



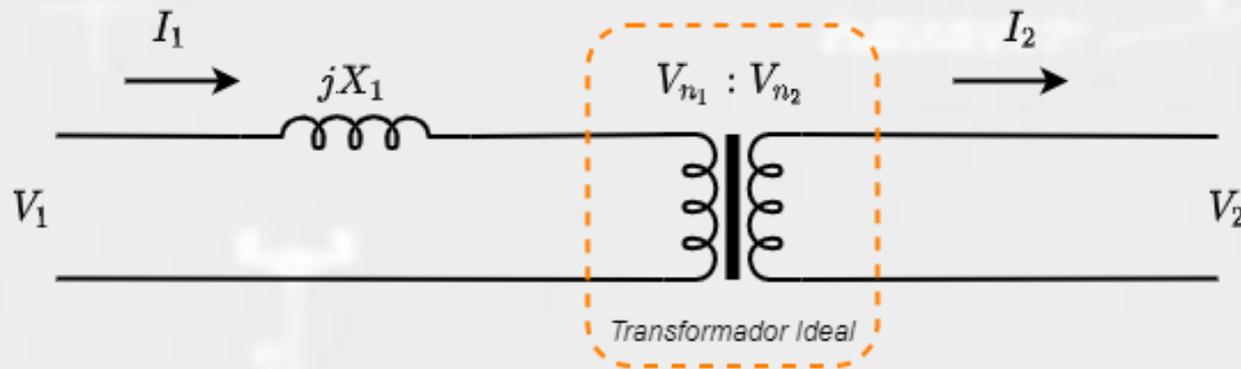
En este modelo simplificado no se considera reactancia de magnetización, pérdidas en el hierro ni pérdidas resistivas en el cobre. Sólo reactancia de dispersión (fuga de flujo magnético en cada devanado).

Donde:

$$V_1 - I_1 \cdot jX'_1 = \frac{V_{n1}}{V_{n2}} (I_2 \cdot jX'_2 + V_2)$$

Aquí podemos expresar la impedancia del secundario referida al primario (o viceversa).

TRANSFORMADOR MONOFÁSICO EN P.U. (II)



$$X_1 = X'_1 + \left(\frac{V_{n1}}{V_{n2}} \right)^2 X'_2$$

Con lo cual, la expresión anterior se reescribe:

$$V_1 - I_1 \cdot jX_1 = \left(\frac{V_{n1}}{V_{n2}} \right) V_2$$

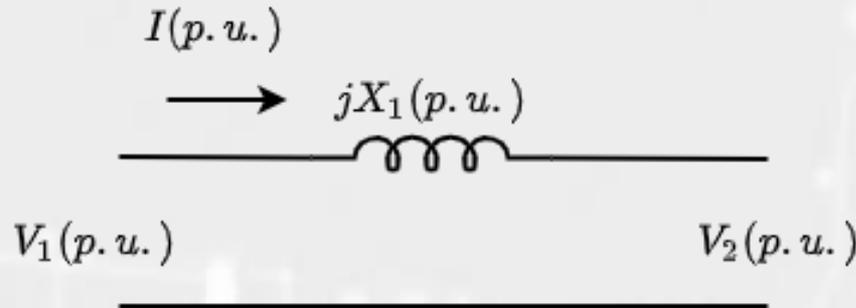
Y si expresamos en tanto por unidad:

$$\frac{V_1}{V_{BI}} - \frac{I_1}{I_{BI}} \cdot j \frac{X_1}{Z_{BI}} = \frac{V_{n1}/V_{BI}}{V_{n2}/V_{BII}} \cdot \frac{V_2}{V_{BII}} \quad \text{donde} \quad I_{BI} = \frac{S_B}{V_{BI}} \quad Z_{BI} = \frac{V_{BI}^2}{S_B}$$

TRANSFORMADOR MONOFÁSICO EN P.U. (III)

Pero si escogemos $V_{BI}/V_{BII} = V_{n1}/V_{n2}$, entonces $\frac{V_{n1}/V_{BI}}{V_{n2}/V_{BII}} = 1$

$$V_1(p.u.) - I_1(p.u.) \cdot jX_1(p.u.) = V_2(p.u.)$$

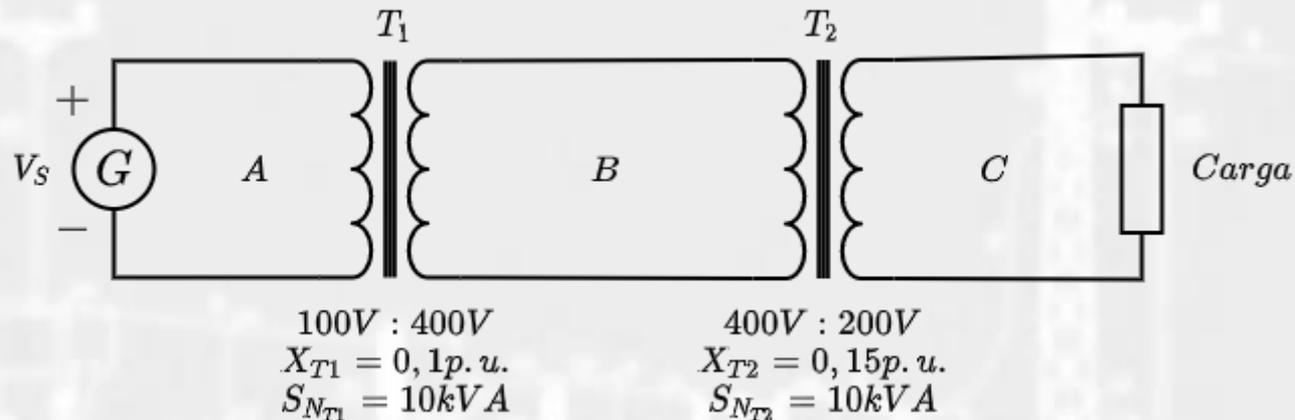


→ Los transformadores definen la frontera entre sectores con diferentes voltajes, corrientes e impedancias base. Todos comparten la misma potencia base.

→ Si los voltajes base se definen a través de las relaciones de transformación de voltajes de los transformadores que conectan cada sector, el circuito equivalente en p.u. no requiere que se incluya la relación de transformación (transformador ideal), simplificando el trabajo algebraico.

EJEMPLO 1.1

Sea el sistema monofásico conformado por un generador, dos transformadores en cascada y una carga resistiva pura. El transformador entrega 10 kVA a la carga, cuya tensión es 200 V.



Se solicita lo siguiente:

- Dibuje el circuito en tanto por uno equivalente del sistema. Utilice potencia base $S_B = 10 \text{ kVA}$ y voltaje base en C igual a $V_{B(C)} = 200 \text{ V}$.
- Calcule la tensión en los bornes del generador, expresando su resultado en p.u. base común y en Voltios.

- Equivalencia entre voltaje monofásico (fase - neutro) y trifásico (fase - fase) en p.u.

$$V_{p.u.1\phi} = \frac{V_{fn}}{V_{B fn}} = \frac{V_{ff} / \sqrt{3}}{V_{B ff} / \sqrt{3}} = \frac{V_{ff}}{V_{B ff}} = V_{p.u.3\phi}$$

- Corriente de línea (1 fase) en sistema trifásico en p.u.

$$I_{p.u.} = \frac{I_{fase}}{I_{B fase}} = \frac{I_{fase}}{S_{B 1\phi} / V_{B fn}} = \frac{I_{fase}}{\frac{S_{B 3\phi}}{3} / \frac{V_{B ff}}{\sqrt{3}}} = \frac{I_{fase}}{S_{B 3\phi} / (\sqrt{3} \cdot V_{B 3\phi})}$$

□ Corriente base:

$$I_B = \frac{S_{B\ 3\phi}}{\sqrt{3} \cdot V_{B\ 3\phi}} = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot V_B}$$

□ Impedancia base (para cargas equilibradas conectadas en Y):

$$Z_B = \frac{(V_{B\ fn})^2}{S_{B\ 1\phi}} = \frac{\left(\frac{V_{B\ ff}}{\sqrt{3}}\right)^2}{S_{B\ 3\phi}/3} = \frac{(V_{B\ ff})^2/3}{S_{B\ 3\phi}/3} = \frac{V_B^2}{S_B}$$

SISTEMAS TRIFÁSICOS (III)

- ❑ Cargas equilibradas conectadas en Δ : son cargas conectadas en delta. Se pueden transformar a Y , o bien usar:

$$I_{B\Delta} = \frac{I_B}{\sqrt{3}}$$

$$Z_{B\Delta} = 3 \cdot Z_B$$

¡¡MUY IMPORTANTE!! En sistema trifásicos, cuando hablamos de...

Voltaje → Voltaje fase - fase

Corriente → Corriente de línea (fase A)

Potencia → Potencia trifásica (potencia conjunta de las 3 fases)

Impedancia → Impedancia serie o fase - neutro en fase A

A menos que se explicita otra cosa.

- **Cambios de base:** en máquinas como generadores sincrónicos y transformadores, es usual expresar impedancias en p.u. base propia. Es decir, tomando como voltaje base el voltaje nominal de la máquina y como potencia base la potencia nominal.

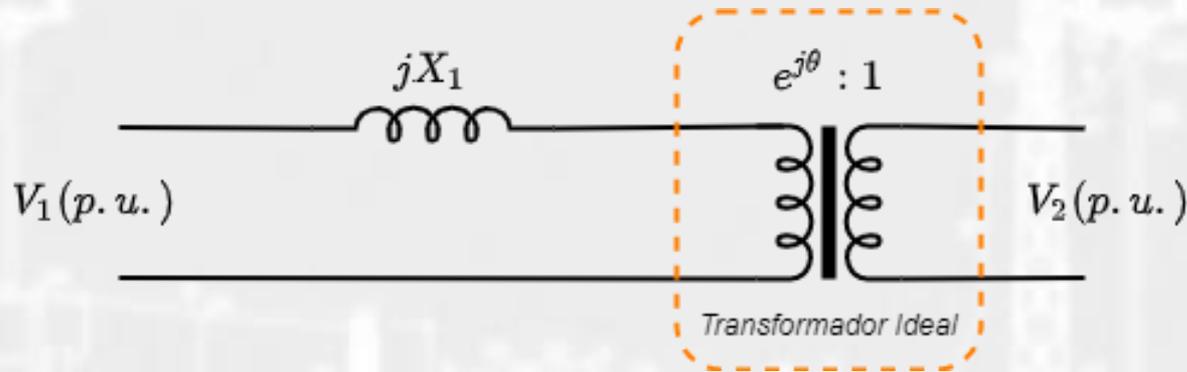
→ Se hace necesario expresar esta impedancia en p.u. base propia (b.p.) como una impedancia en p.u. base común (b.c.).

$$Z(p.u.)_{b.c.} = Z(p.u.)_{b.p.} \cdot \frac{S_B}{S_{NOM}} \cdot \left(\frac{V_{NOM}}{V_B} \right)^2$$

En general,

$$Z(p.u.)_{B1} = Z(p.u.)_{B2} \cdot \frac{S_{B1}}{S_{B2}} \cdot \left(\frac{V_{B2}}{V_{B1}} \right)^2$$

- **Desfases:** dependiendo del conexionado entre los enrollados de un transformador trifásico, es posible configurar desfases (θ) entre las tensiones/corrientes de entrada y salida del transformador. Podemos incorporar este efecto en el circuito monofásico equivalente en p.u.:



→ Se suele omitir el desfase en el circuito equivalente monofásico en p.u., pues habitualmente no es relevante en el análisis del SEP. Esto porque no influye en las tensiones y flujos de potencia a uno u otro lado del transformador.

→ En sistemas enmallados, se debe garantizar correcto conexionado y relación de transformación de transformadores que conecten paralelamente dos sectores del SEP por diferentes rutas. Aquí sí influye el ángulo de desfase.

- Transformadores en paralelo:** cuando se interconectan dos barras a través de mallas con transformadores, es necesario que el producto de las relaciones de transformación por cada malla sean iguales entre sí. Por ejemplo:

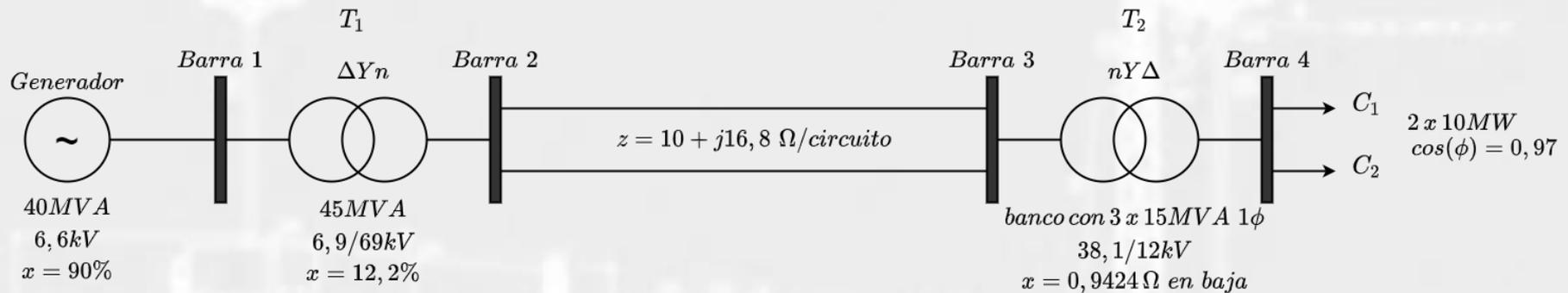


Operatoria general:

1. Se elige una potencia base S_B común a todo el SEP.
2. Se elige un voltaje base en alguno de los sectores del SEP, habitualmente igual a un valor nominal en ese sector. Los otros voltajes base se calculan a través de las relaciones de transformación de voltajes de los transformadores que conectan cada sector.
3. Teniendo la potencia base S_B y los voltajes base V_{bi} , se calculan las impedancias base y corriente base en cada sector del SEP.
4. Las impedancias expresadas en p.u. base propia se transforman a p.u. base común.
5. Se dibuja el circuito monofásico equivalente el p.u., expresando todos sus valores en base común.
6. Calculamos lo que se requiera, obteniendo resultados en p.u.
7. Se multiplica los resultados por su valor base, obteniendo lo solicitado en variables físicas.

EJEMPLO 1.2

En el SEP de la figura, las tensiones nominales de las barras son 6,9 kV, 66 kV y 12 kV, respectivamente. Cuando ambas cargas lineales C_1 y C_2 están conectados, la tensión en la barra 4 es de sólo 10,8 kV.

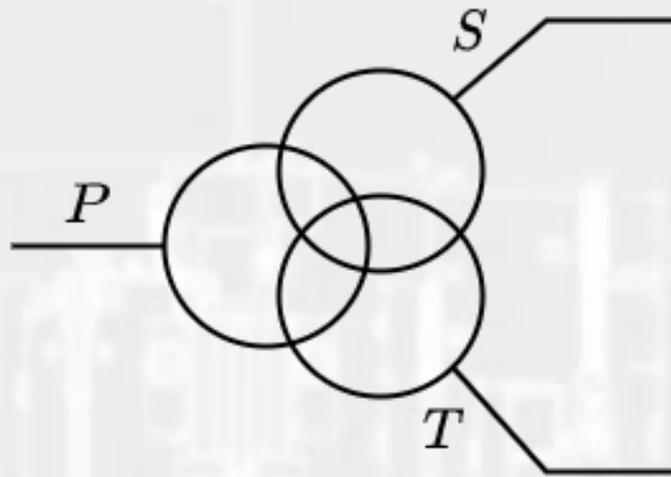


Si la f.e.m. del generador permanece constante, calcule la tensión fase - fase en los bornes de la barra 4 cuando se ha desconectado la carga C_2 . Utilice potencia base $S_B = 100 \text{ MVA}$ y voltaje base en barra 1 igual a $V_{B1} = 6,6 \text{ kV}$.

TRANSFORMADOR DE 3 ENROLLADOS (I)

Transformador trifásico de 3 enrollados, donde existen diferentes capacidades de potencia e impedancias serie en cada uno de ellos. La conexión más frecuente es $YY\Delta$.

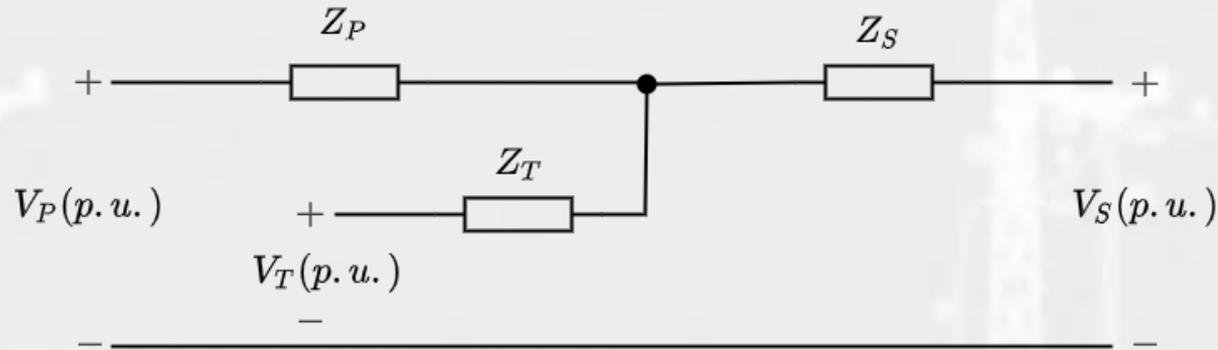
Sean:



- Z_{pS} : Impedancia serie medida en primario, con secundario en cortocircuito y terciario abierto, referida al primario.
- Z_{pT} : Impedancia serie medida en primario, con secundario abierto y terciario en cortocircuito, referida al primario.
- Z_{sT} : Impedancia serie medida en secundario, con secundario abierto y terciario en cortocircuito, referida al primario.

TRANSFORMADOR DE 3 ENROLLADOS (II)

Respetando la relación de transformación entre los enrollados en la definición de los voltajes base y utilizando una potencia base común, se tiene el siguiente circuito monofásico equivalente en p.u.:



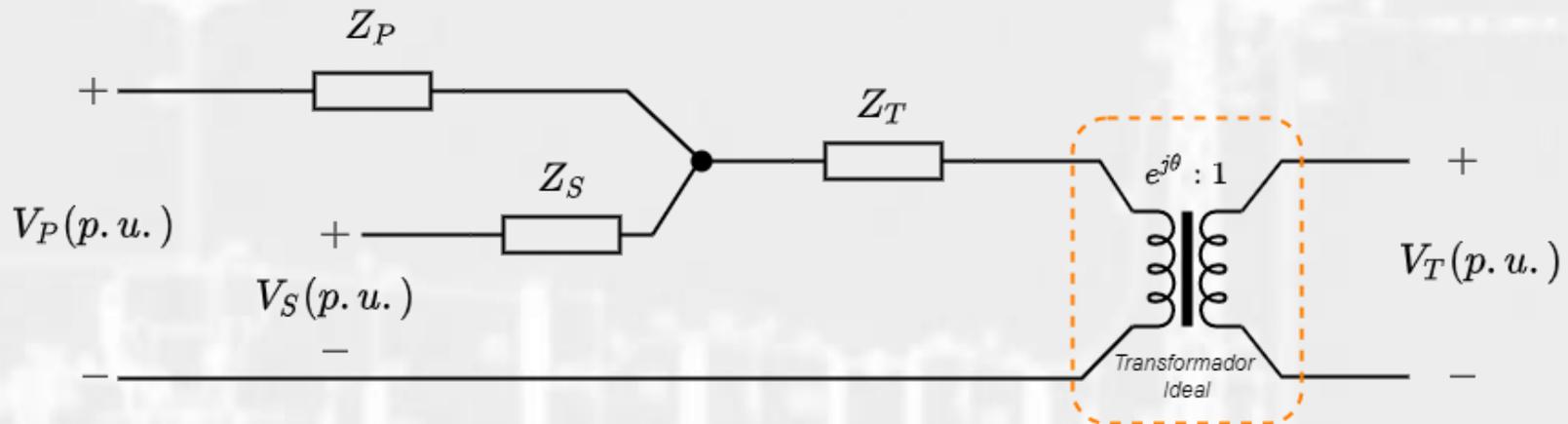
Donde:

$$\left. \begin{aligned} Z_{PS} &= Z_P + Z_S \\ Z_{PT} &= Z_P + Z_T \\ Z_{ST} &= Z_S + Z_T \end{aligned} \right\} \quad \longrightarrow \quad \begin{aligned} Z_P &= \frac{1}{2} (Z_{PS} + Z_{PT} - Z_{ST}) \\ Z_S &= \frac{1}{2} (Z_{PS} + Z_{ST} - Z_{PT}) \\ Z_T &= \frac{1}{2} (Z_{PT} + Z_{ST} - Z_{PS}) \end{aligned}$$

Las impedancias resultantes (Z_P , Z_S , Z_T) no son cantidades físicas, sino que resultan de la manipulación matemática de las impedancias serie.

TRANSFORMADOR DE 3 ENROLLADOS (III)

Y si la conexión es $YY\Delta$, como es habitual en este tipo de transformadores, con un transformador ideal con relación de transformación unitaria podemos incorporar el desfase:

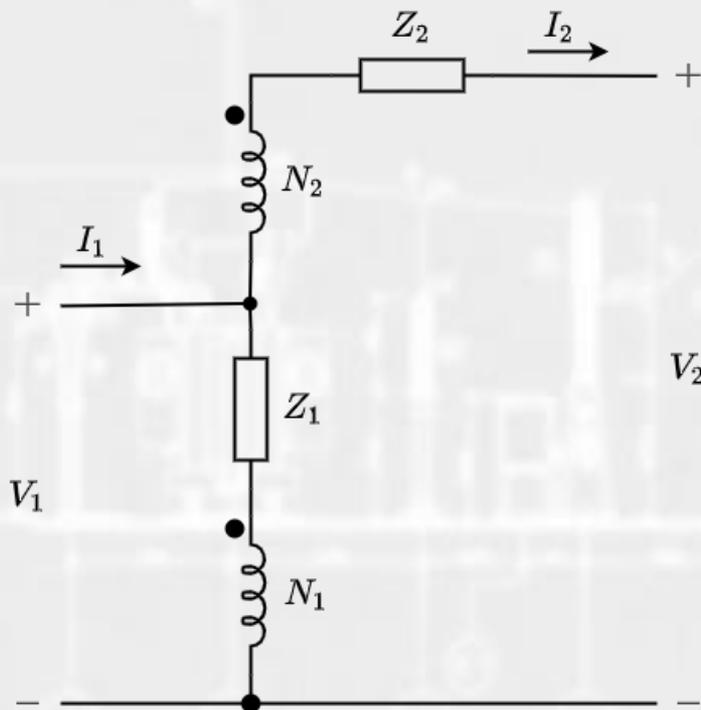


Por las razones antes expuestas, se suele omitir el cambio de fase que representa el transformador ideal en el circuito equivalente monofásico en p.u.

AUTOTRANSFORMADOR (I)

Un autotransformador se puede considerar equivalente a un transformador al que se han conectado en serie sus enrollados primario y secundario.

- Mayor eficiencia y capacidad de potencia.
- No tiene aislación galvánica entre enrollados.



Relación de transformación:

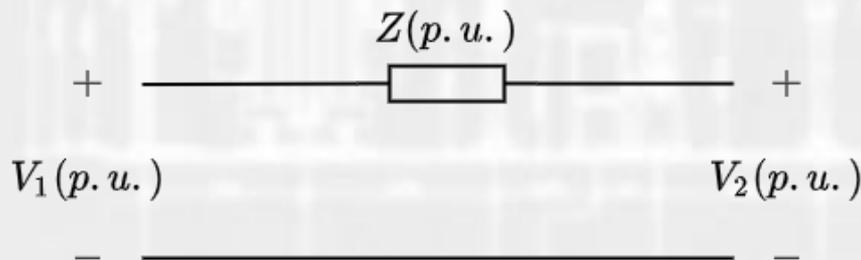
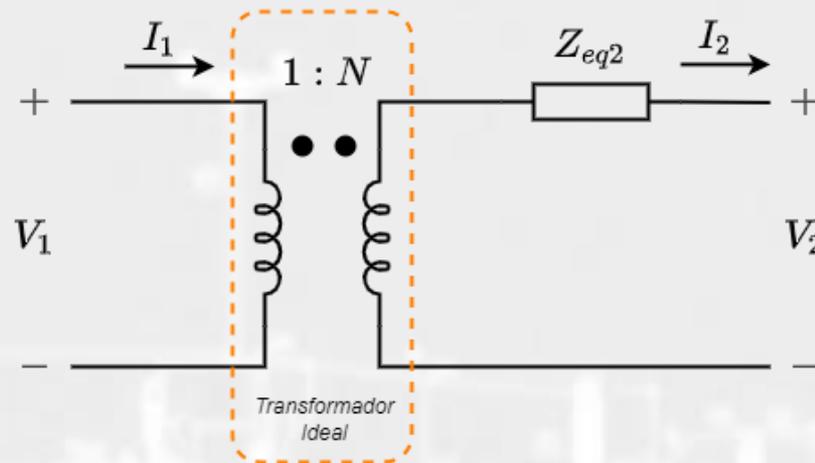
$$V_2 = \underbrace{\frac{N_1 + N_2}{N_1}}_{N > 1} \cdot V_1$$

Impedancia referida al lado de alta:

$$Z_{eq2}^{autotrafo} = \left(1 - \frac{1}{N}\right)^2 Z_{eq2}^{trafo}$$

AUTOTRANSFORMADOR (II)

Relación entre impedancia de autotransformador y transformador en base al cual se construye:



Impedancia equivalente:

$$Z_{eq2}^{autotrafo} = \left(1 - \frac{1}{N}\right)^2 Z_{eq2}^{trafo}$$

Si:

$$S_{B1} = S_{B2} = S_B \quad ; \quad \frac{V_{B2}}{V_{B1}} = N$$

$$\rightarrow \frac{I_{B2}}{I_{B1}} = N^{-1} \quad ; \quad \rightarrow Z_{B2} = N^2 Z_{B1}$$

Entonces:

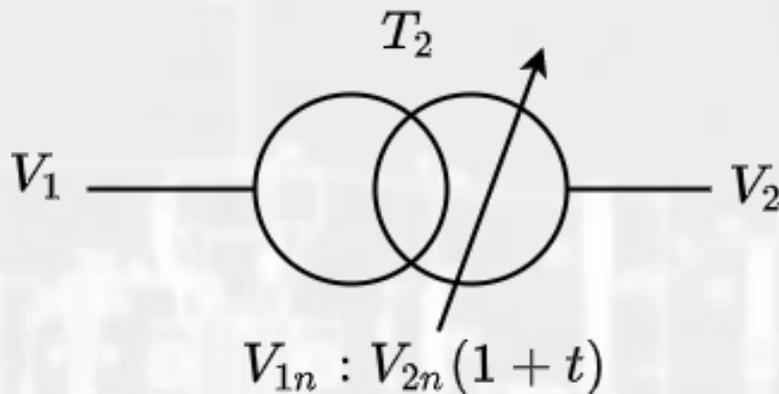
$$\rightarrow Z_{eq2}(p.u.) = Z_{eq1}(p.u.) = Z(p.u.)$$

TRANSFORMADOR CON DERIVACIONES (TAP) (I)

Son transformadores cuya relación de transformación se puede modificar a través del cambio en el número de vueltas de uno de sus enrollados (típicamente, en el lado de alta tensión).

Se usan para regulación de tensión:

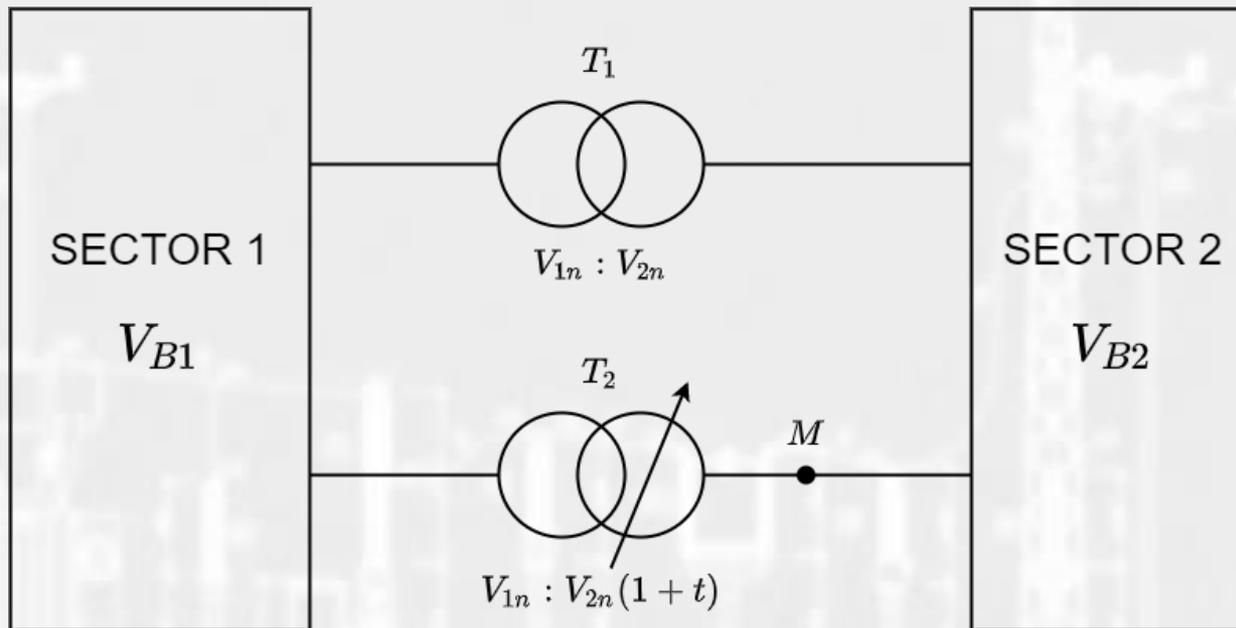
- Cambio de tap en vacío: regulación fija.
- Cambio de tap en operación: regulación cuasi-continua.



Rango total de variación: $\pm 10\%$; $\pm 12\%$; $\pm 15\%$ (como límite)
Magnitud del paso entre derivaciones: $1,25\%$; $1,5\%$

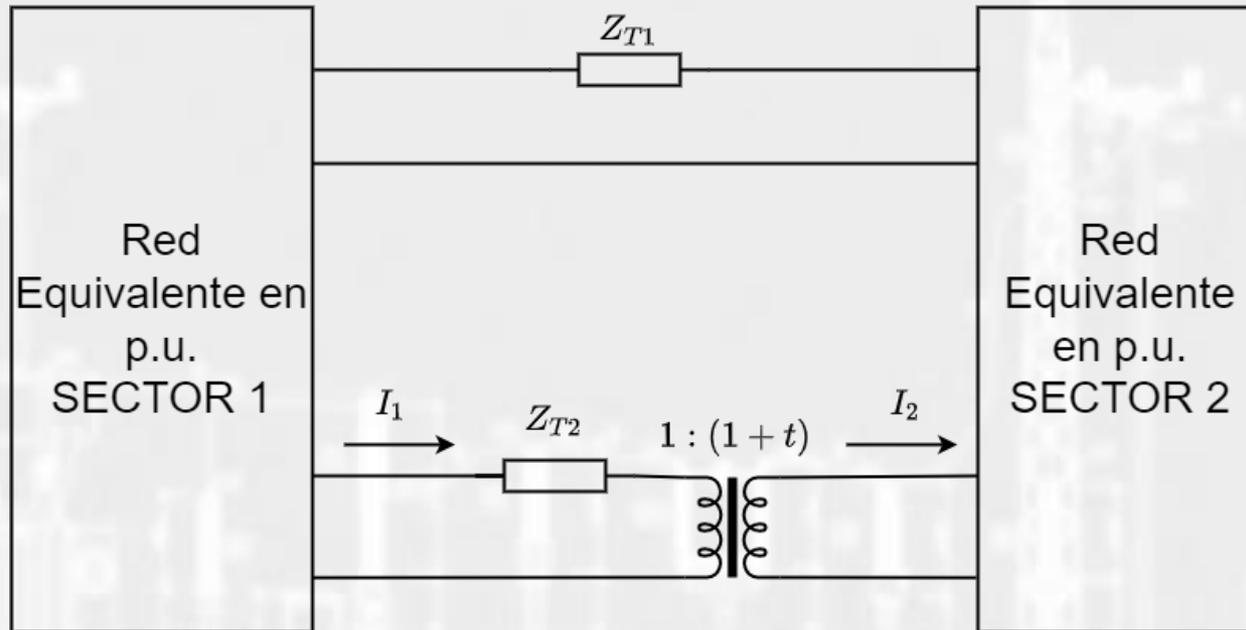
En SEP de topología radial, en p.u. simplemente se definen voltajes base considerando el TAP. Si es enmallado, el análisis es un poco más complejo.

Si $t \neq 0$, al punto M le corresponden dos voltajes base distintos en forma simultánea!!



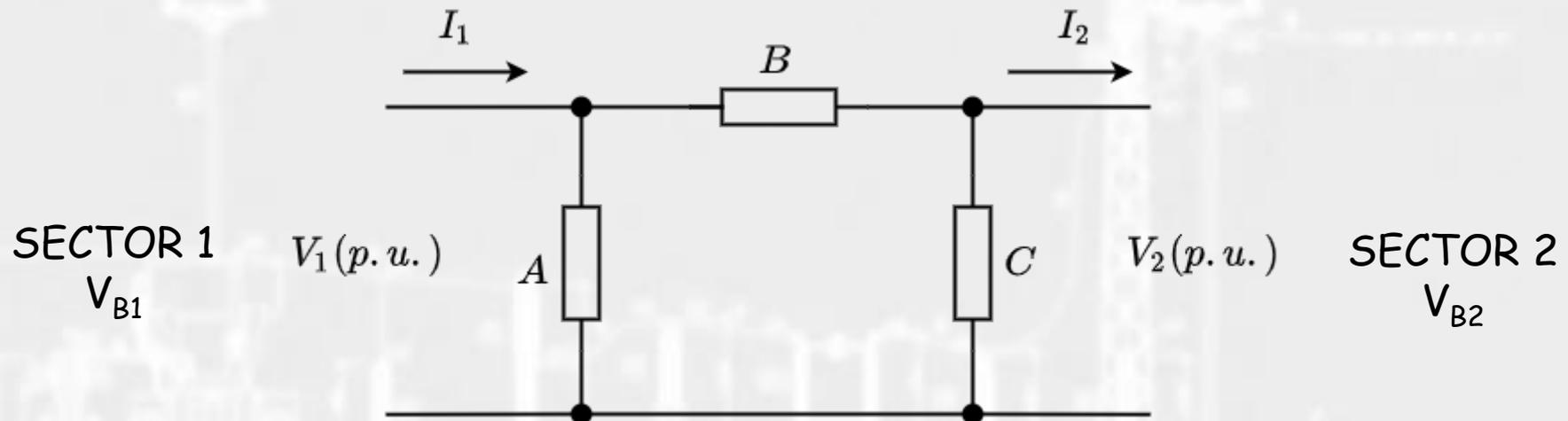
Por la izquierda: $V'_{B2} = V_{B1} \cdot \frac{V_{2n}(1+t)}{V_{1n}}$; mientras que por la derecha: $V_{B2} = V_{B1} \cdot \frac{V_{2n}}{V_{1n}}$

En el circuito equivalente monofásico, incluimos un transformador ideal para considerar cambio de base:



Si definimos $\alpha = 1 + t$ y expresamos la impedancia del transformador T_2 como su admitancia (recíproco en p.u.) $Y = Y_{T2}(p.u.) = [Z_{T2}(p.u.)]^{-1}$, entonces podemos expresar el transformador T_2 a través de un circuito π equivalente monofásico en p.u.

El circuito equivalente monofásico del transformador con cambiador de TAP (T_2) en el caso mostrado, corresponde al siguiente:



Con:

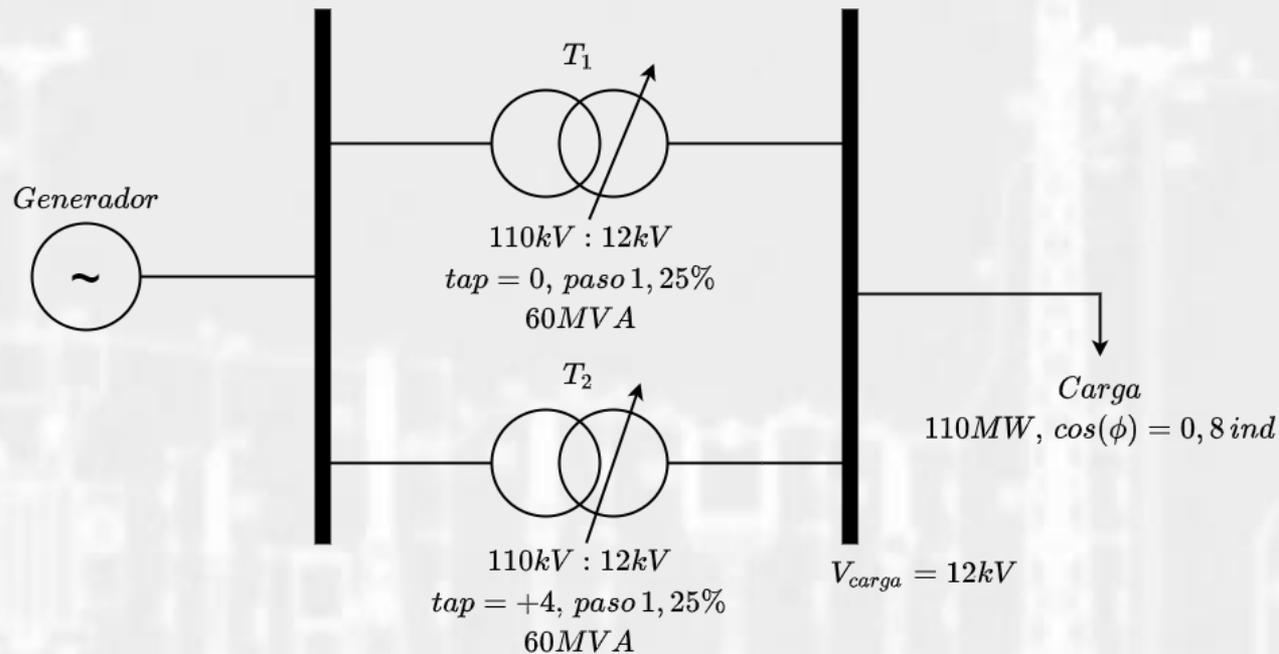
$$A = Y \left(1 - \frac{1}{\alpha} \right)$$

$$B = \frac{Y}{\alpha}$$

$$C = Y \left(\frac{1}{\alpha^2} - \frac{1}{\alpha} \right)$$

EJEMPLO 1.3

Dos transformadores de 110/12 kV, 60 MVA, $X = 14,52 \Omega$ medidos en el lado de alta tensión, operan en paralelo alimentando una carga lineal de 110 MW, f.p. = 0,8 inductivo, a tensión nominal de 12 kV.



¿Cómo se reparte la carga entre estos transformadores, si uno de ellos está operando en derivación central (T_1) y el otro (T_2) está en tap +4? El cambiador de tap está en el lado de baja tensión y cada paso es de 1,25%.

TRABAJO PERSONAL:

- Para repasar cálculo en tanto por uno, leer comprensivamente y rehacer ejemplos del apartado 2.5. "Atrapando el Sol en los Sistemas Eléctricos de Potencia", Walter Brokering y Rodrigo Palma (www.centroenergia.cl).
- Rehacer los ejercicios vistos en esta clase.
- Repasar contenidos de máquinas eléctricas (cursos previos de Ingeniería Civil Eléctrica - U. de Talca), muy recomendable previo a la próxima clase: Generador Síncrono, Transformador de Potencia.

BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA:

- ❑ Capítulo 2 del e-libro "Atrapando el Sol en los Sistemas Eléctricos de Potencia", Walter Brokering y Rodrigo Palma (www.centroenergia.cl).
- ❑ Apuntes de Sistemas Eléctricos de Potencia del profesor Rodrigo Palma B., Universidad de Chile.
- ❑ Apuntes de Sistemas Eléctricos de Potencia I del profesor Sergio Carter, Universidad de La Frontera.
- ❑ Apuntes de Sistemas Eléctricos de Potencia, profesor Hernán Sanhueza, Universidad de Santiago de Chile.