

SUBESTACIONES

FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y CONSIDERACIONES

**ING. JOSÉ CARLOS ROMERO ESCOBAR
PROFESOR TITULAR**

**UNIVERSIDAD NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

2.001

Ing. José Carlos Romero Escobar.

Ingeniero Electricista de la UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA 1968, con estudios en Líneas de Alta Tensión, Subestaciones Eléctricas y Sistemas de Potencia. Especialista en Centrales y Subestaciones, Protección de Sistemas Eléctricos y Líneas de Transmisión. Trece años de experiencia en INGETEC LTDA, desempeñándose como Ingeniero Especialista, Asesor del Director de División. Proyectos: Chivor, Salvajina, Guavio, Chingaza, Sexto programa de ensanches E.E.B. Veinte años como Ingeniero Consultor Gerente R.M.A. LTDA. Ingeniería. Profesor Titular de la Universidad Nacional de Colombia Docente de las Universidades Pontificia Javeriana , La Salle, América y del Meta. Autor de los Escritos *Protecciones Eléctricas, Seguridad Eléctrica, Filosofía General de Protecciones y Control, Seminario Internacional de Puestas a Tierra, Subestaciones Convencionales y Encapsulados en SF6. Director de Proyectos de Grado.*

CAPITULO 4

TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTOS

INTRODUCCIÓN

Las normas publicadas en los diferentes países como ANSI C57.13, relativas a los transformadores de instrumentos, especifican las características que deben reunir éstos para garantizar su buen funcionamiento, tanto en condiciones normales como anormales de operación, y por otro lado, conceden un lugar importante a las características de precisión y cargabilidad.

Los transformadores de instrumentos son utilizados para alimentar los aparatos de medida, control y protección tales como: contadores, voltímetros, amperímetros, relevadores, etc.

Tienen como función principal reducir a valores manejables no peligrosos y normalizados, las características de tensión e intensidad en una red eléctrica con el objeto de permitir el empleo de aparatos de medidas normalizados, por lo tanto más económicos. Además sirven para aislar, a las personas que están en contacto con estos aparatos, de la alta tensión y/o corriente que se presentan a menudo en este tipo de instalaciones.

4.1. TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

4.1.1. Circuito Equivalente

Todos los transformadores se pueden representar por medio de un circuito equivalente, donde los parámetros están referidos al mismo lado de tensión.

El transformador de corriente es un instrumento en el que teóricamente la corriente secundaria, en condiciones normales de funcionamiento es proporcional a la corriente

primaria y está desfasada de ésta en un ángulo cercano a cero. El primario de este transformador está conectado en serie con el circuito que se desea, por tanto debe soportar las mismas exigencias en cuanto a corriente nominal y corriente de falla. Todo transformador y particularmente todo transformador de instrumentos se puede representar por un circuito equivalente como se muestra en la Figura 1.

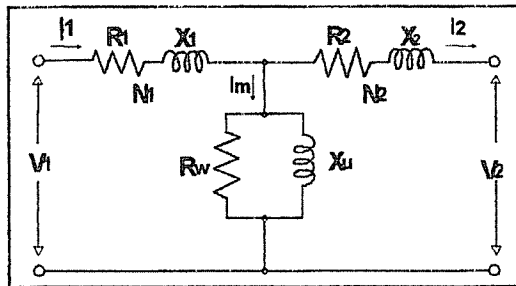


Figura 1. Circuito equivalente de un transformador

El circuito equivalente de un transformador de corriente incorpora los parámetros de:

- N_1 : Número de espiras en el primario
- N_2 : Número de espiras en el secundario
- Z_1 : Impedancia del primario
- Z_2 : Impedancia del secundario
- Z_m : Impedancia de magnetización
- Z_b : Impedancia de carga en el secundario
- I_1 : Corriente en el primario
- I_2 : Corriente en el secundario
- I_m : Corriente en la rama de magnetización
- V_1 : Tensión a la entrada
- V_2 : Tensión a la salida
- R_1 : Resistencia primaria
- X_1 : Reactancia primaria
- R_2 : Resistencia secundaria
- X_2 : Reactancia secundaria
- R_w : Resistencia magnetizante
- X_w : Reactancia magnetizante

Se obtiene un circuito equivalente exacto al relacionar:

$$V_1 = I_1 Z_1 + \frac{N_1}{N_2} (V_2 + I_2 Z_2)$$

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} (I_2 + I_m)$$

Transfiriendo Z_1 al secundario, el valor decrece en un factor igual a N_1/N_2 al cuadrado, por lo tanto $Z_1 (N_1/N_2)^2$ - en el secundario- es muy pequeño y puede despreciarse para obtener el circuito equivalente de la Figura 2.

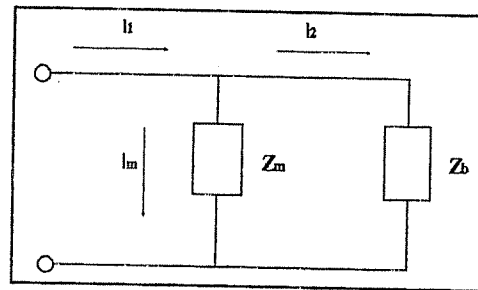


Figura 2. Circuito Equivalente de un transformador de corriente

4.1.2. Error y Curvas de Saturación

En el transformador de corriente las impedancias primarias no tienen ninguna influencia sobre la precisión del aparato, ellas únicamente introducen una impedancia en serie con la línea, la cuál es despreciable. El error se debe a la corriente que circula por la rama magnetizante.

Las curvas de saturación o excitación del secundario en un TC se obtienen mediante un ensayo de circuito abierto; con el circuito secundario del transformador abierto, la corriente I_2 es esencialmente cero y E_2 es igual al voltaje medido V_2 . La cantidad de corriente de excitación - I_m requerida para magnetizar el núcleo del TC depende del material, del tipo de laminado y de la cantidad de voltaje requerido para satisfacer la carga óptima impuesta (Z_b) en el secundario del TC. Una curva de saturación es una representación de la relación I_m a E_2 (la diferencia entre E_2 y V_2 es el voltaje a través de Z_2).

El error de corriente es en $\% = (K_n I_2 - I_1) / I_1 * 100$
 donde K_n es igual a I_{1n} / I_{2n} en magnitud.

El error en fase es I_m/I_2 (también se obtiene una aproximación al error en magnitud).

La utilización del transformador de corriente se logra mediante la conversión de una corriente grande en el primario a una magnitud de corriente más baja en el secundario, por tanto el cociente N_1/N_2 es normalmente menor que 1. En la Figura 3. se pueden observar las características de excitación y ángulo de fase para tres tipos de transformadores.

Tabla 1.

CURVA	ERROR [A]	RESIST. DEL DEVANADO [Ω]
A	100/5	0.670
B	600/5	0.262
C	1200/5	0.047

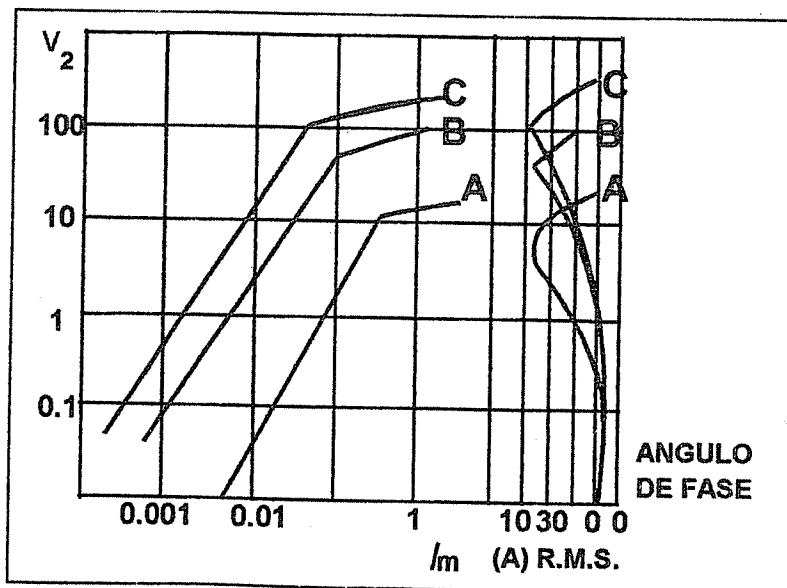


Figura 3. Características de excitación y ángulo de fase

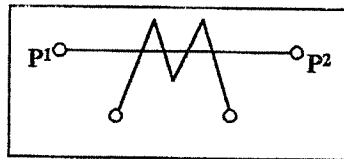
Observando las curvas de saturación de los TC se puede anotar:

- La corriente de excitación depende de E_2 , que depende a su vez de V_2 y éste de la carga óptima conectada al secundario. También depende de la corriente primaria del TC
- Algunos valores de I_2 no pueden obtenerse cuando el núcleo del TC está completamente saturado, después de que I_m satura el núcleo un incremento adicional de la corriente del primario produce un gran incremento en la corriente magnetizante y un pequeño incremento de I_2

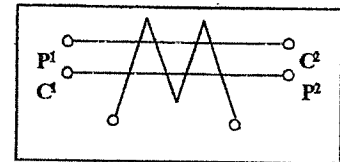
También se pueden obtener curvas de permeabilidad y errores en los TC.

4.1.3. Esquemas de conexión

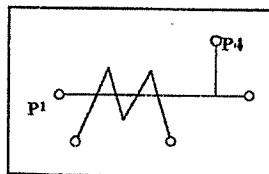
Un transformador de corriente puede tener uno o varios devanados secundarios bobinados sobre uno o varios circuitos magnéticos separados. En la Figura 4. se muestran algunos esquemas clásicos para distinguir la representación e identificación de los transformadores de corriente.



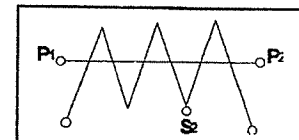
A. TC normal de simple relación de transformación, un solo circuito magnético y un bobinado secundario.



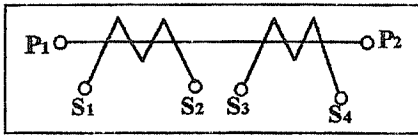
B. TC con doble relación de transformación por medio de conexión serie o paralelo sobre el devanado primario, un circuito magnético.



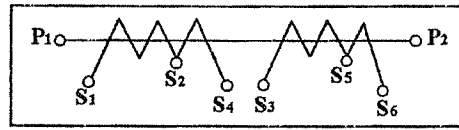
C. TC con doble relación de transformación por medio de rama sobre el devanado primario, un sólo circuito magnético.



D. TC con doble relación de transformación por medio de toma sobre el secundario, un circuito magnético.



E. TC con una relación de transformación y dos devanados secundarios independientes, dos circuitos magnéticos.



F. TC con dos relaciones de transformación por medio de tomas sobre los devanados secundarios, dos bobinados secundarios independientes, dos circuitos magnéticos.

Figura 4. Esquemas de Conexión

4.1.4. Efecto del Burden (Carga Secundaria) en la Saturación del TC

Es necesario hacer una aclaración de términos, cuando se refiere a la carga del TC, se trata de la corriente primaria y para referirse al burden (carga óptima) como la impedancia total conectada al secundario del TC.

El burden es la propiedad del circuito conectado al devanado del secundario, la cual determina su potencia activa y reactiva en el devanado secundario. El burden es expresado como la impedancia total en Ohmios con el efecto activo y reactivo de sus componentes, o como el total de voltio-amperios y factor de potencia en el valor especificado de corriente, voltaje y frecuencia. La saturación del TC está relacionada con el burden y con la corriente primaria. Para dos TC idénticos con diferente burden conectado, el TC con mayor burden se satura con un valor de corriente primaria más pequeña que la requerida para saturar el TC con menor burden. La conexión al secundario de una carga por encima del burden del TC es sumamente peligroso, ya que el TC pierde sus cualidades de exactitud y precisión.

En el modelo del TC se asume que el burden conectado Z_b va a ser una impedancia variable, inicialmente se considera la impedancia del burden bastante baja para permitir que el TC opere en la región lineal de su curva de saturación.

Incrementando el burden con la carga, el voltaje secundario debe incrementarse proporcionalmente hasta alcanzar el codo de la saturación, un incremento adicional en el burden ocasiona la reducción de la corriente secundaria y un incremento en la corriente de excitación.

Cuando la impedancia del burden tiene un valor grande, la corriente del secundario se acerca a cero y toda la corriente del primario es usada como corriente de excitación. Eso significa que toda la corriente tiene que ser absorbida por la impedancia de saturación del TC. El voltaje secundario puede alcanzar niveles altos de tensión que presentan serios problemas al personal como también sobretensiones en el aislamiento del secundario del TC, de los burden conectados y en las espiras.

4.1.5. Selección de Transformadores de Corriente

La selección de un transformador de corriente depende de:

- El tipo de instalación: Puede ser de tipo interior o exterior
- El tipo de aislamiento: Los transformadores de corriente están expuestos a las mismas sobretensiones de las líneas y a la misma sollicitación de corriente
- La potencia: Depende de la función a que se destine el aparato, ver "burden"
- Clase de precisión: Error máximo admisible en por ciento que el transformador puede introducir en la medición, operando con su corriente nominal primaria y a frecuencia nominal

La Norma ANSI C57.13 define la clase de precisión como el error máximo admisible en por ciento que el transformador puede introducir en la medición de potencia.

Los TC tienen como finalidad, llevar la intensidad de la corriente a un valor bajo para manipular y alimentar aparatos. Conectados en serie con las líneas, están sujetos a las mismas sobretensiones y sobreintensidades que ellas.

i. **Instalación.** Puede estar influida por la posición, altura, mantenimiento previsto, etc.

ii. **Tensión Nominal de Aislamiento.** Debe ser cuando menos igual a la tensión más elevada del sistema en que se utilice, aunque también tienen influencia las condiciones climáticas, ambientales y la altura sobre el nivel del mar.

Realización: Los transformadores están provistos de un solo circuito magnético cuando alimentan un solo aparato que tiene una función bien definida, por ejemplo: Medición o protección, o cuando las exigencias del uso permitan conectar sobre el mismo circuito magnético, aparatos para funciones diferentes en donde las exigencias mutuas de ellas no tengan consecuencias, por ejemplo: Un amperímetro indicador y un relé de sobrecorriente.

Cuando se requieren núcleos separados, cada circuito magnético alimenta los aparatos que tengan una función definida, por ejemplo, un transformador que tenga tres circuitos magnéticos separados podría alimentar:

- El primero, mediciones de precisión como tarifarios
- El segundo, una protección diferencial
- El tercero, mediciones industriales y relés de sobrecorriente

Un aparato construido con dos o tres circuitos magnéticos separados se comporta, teóricamente, como si se tratase de dos o tres aparatos completamente diferentes, ya que solo el devanado primario es común, los devanados secundarios y los circuitos magnéticos son completamente independientes y separados.

iii. **Corrientes Normalizadas:** La corriente nominal de los devanados primario y secundario de un TC son los valores para los cuales están diseñados.

Corriente nominal primaria. Se seleccionará generalmente el valor normalizado superior a la corriente nominal de la instalación.

En ciertos tipos se realiza una doble o triple relación primaria, ya sea por medio de conexiones serie-paralelo del bobinado primario, o por medio de tomas en los devanados secundarios.

El valor normalizado de corriente nominal secundaria es generalmente 5 amperios aunque se puede seleccionar 1 amperio. Cuando el alambrado del secundario representa una carga importante.

Tabla 2. Valores Normalizados

SIMPLE RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN Corriente nominal primaria A		DOBLE RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN Corriente nominal primaria A	
5	150	2* 5	2*100
10	200	2*10	2*150
15	300	2*15	2*200
20	400	2*25	2*300
25	600	2*50	2*400
30	800	2*75	2*600
40	1200		
50	1500		
75	2000		
100	3000		

- iv. **Potencia Nominal Burden:** Es la potencia aparente secundaria con corriente nominal, considerando las prescripciones relativas a límites de errores. Está indicado, generalmente, en la placa de características y se expresa en voltamperios.

Para escoger la potencia nominal de un TC, es necesario hacer la suma de todas las potencias de todos los aparatos que serán conectados en serie con el devanado secundario y tener en cuenta las pérdidas por efecto Joule en los cables de alimentación; será necesario tomar el valor inmediato superior a la cifra obtenida. Ver la Tabla 3 según Norma ANSI.

- v. **Clases de precisión:** Las clases de precisión normales son: 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.6, 1.2, 3 y 5 dependiendo de las normas usadas.

La Norma ANSI por ejemplo define tres clases de precisión: 0.3, 0.6, y 1.2. Se presenta un resumen en la Tabla 4.

Tabla 3. Características para 60 Hz e $I_2 = 5$ A (ANSI C57.13)

Designación de la carga	Resistencia [Ω]	Inductancia [mH]	Impedancia [Ω]	VA	F.P.
B0.1	0.09	0.116	0.1	2.5	0.9
B0.2	0.18	0.232	0.2	5.0	0.9
B0.3	0.45	0.580	0.5	12.5	0.9
B1.0	0.50	2.3	1.0	25.0	0.5
B2.0	1.00	4.6	2.0	50.0	0.5
B4.0	2.00	9.2	4.0	100.0	0.5
B8.0	4.00	18.4	8.0	200.0	0.5

Tabla 4. Clases de precisión

10 H 10	2.5 H 10	10 L 10	2.5 L 10
10 H 20	2.5 H 20	10 L 20	2.5 L 20
10 H 50	2.5 H 50	10 L 50	2.5 L 50
10 H 100	2.5 H 100	10 L 100	2.5 L 100
10 H 200	2.5 H 200	10 L 200	2.5 L 200
10 H 400	2.5 H 400	10 L 400	2.5 L 400
10 H 800	2.5 H 800	10 L 800	2.5 L 800

La letra H se refiere a los transformadores con la impedancia secundaria alta.

La letra L se refiere a los transformadores con la impedancia secundaria baja, como los transformadores de tipo boquilla.

El número anterior a la letra, por ejemplo 2.5, 10, es el error máximo de relación porcentual especificado.

El número después de la letra 10, 20, 50, 100, 200, 400, y 800, es la tensión máxima secundaria que el transformador puede tener en sus terminales sin exceder el error de relación especificado para una corriente secundaria 20 veces la nominal. Cuanto más elevado es el número después de la letra mejor es el TC.

La clase de precisión se designa por el máximo error admisible en % que el transformador pueda introducir en la medición de potencia; la precisión se garantiza si el factor de potencia del sistema está entre 1.0 y 0.6 atrasado.

El factor de corrección de la relación se define como:

$$FCR = K_r / K_n$$

K_r es la relación real del transformador

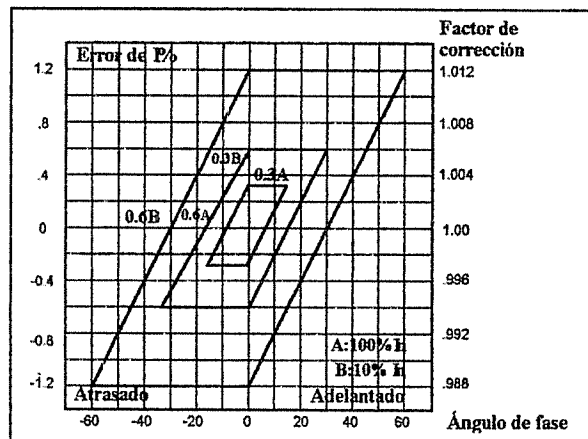
K_n es la relación nominal

La Norma ANSI C57.13 define a las clases de precisión con un paralelogramo colocado en un sistema de ejes cartesianos donde la ordenada representa el factor de corrección (FCR) y la abcisa representa el ángulo de fase. Figura 5.

Se dan a continuación en la Tabla No. 5 las clases de precisión recomendadas según el uso a que se destinen los transformadores de corriente.

Se aconseja alimentar las protecciones diferenciales con transformadores de corriente separados, ya que éstas imponen las condiciones más severas.

El mismo principio se puede aplicar a protecciones de distancia.



**Figura 5. Clases Normales de Precisión.
Límite 0.3 y 0.6 para TC utilizados en medición**

Tabla 5. Clase recomendada para TCs según su uso (ANSI C57.13)

CLASE	UTILIZACIÓN
0.1	Calibración y medidas de laboratorio
0.2-0.3	Medidas de laboratorio. Alimentación de vatímetros para alimentadores de potencia
0.5-0.6	Alimentación de vatímetros para factorización en circuitos de distribución. Vatímetros industriales
1.2	Amperímetros indicadores y registradores Fasímetros indicadores y registradores Vatímetros indicadores industriales y registradores Protecciones diferenciales, relés de impedancia y de distancia
3-5	Protecciones en general (relés de sobrecorriente)

No siempre es posible fabricar transformadores con características de corto circuito muy elevadas debido a limitaciones de espacio. Para construir estos transformadores es necesario tener grandes secciones de cobre en los bobinados con lo que se reduce el número de espiras primarias admisibles. Como la potencia de precisión varía con el cuadrado del número de amperios-vuelta primarios, la precisión de los transformadores hechos para resistir grandes valores de corriente de corto circuito, disminuye considerablemente.

vi. **Datos de placa:** Deben estar escritos en letra indeleble. Se incluye lo siguiente:

- Nombre del fabricante o información para indentificarlo
- El número de serie o la indicación del tipo
- La relación de transformación nominal ($K_n = I_{1n}/I_{2n}$ A)
Ej: (100/5 A)
- Frecuencia nominal (60 Hz)
- Potencia de precisión (Burden) y clase de precisión
Ej: (50 VA, 0.5)
- Tensión nominal máxima
Ej: (230 KV; 245 KV)
- El nivel de aislamiento (BIL o BSL) en KV

- La corriente nominal de corto circuito térmica y la corriente dinámica correspondiente
Ej: (13 KA ó 13/40 KA), respectivamente
- Clase de aislamiento, si no es A
- Para dos arrollamientos secundarios, la utilización de bornes y de sus elementos correspondientes

4.1.6. Tipos de Transformadores de Corriente

i. Según su construcción

Tipo devanado (Primario). Este tipo tiene el devanado del primario y del secundario completamente aislados y permanentemente montados sobre el núcleo. El primario es usualmente un devanado de muchas vueltas, pero puede estar constituido por una sola vuelta, provisto de una carcasa que encierra mecánicamente el núcleo

Tipo barra. Devanado primario y secundario aislados y montados sobre el núcleo. El primario consiste en un conductor tipo barra pasando a través de la ventana del núcleo

Tipo ventana. Tiene el secundario totalmente aislado y montado sobre el núcleo pero no tiene arrollamiento primario. El aislamiento puede estar o no calculado para un conductor primario pasando a través de la ventana del núcleo

Tipo boquilla. Tiene secundario completamente aislado y fijo sobre el núcleo, no tiene devanado primario o aislamiento para primario. Es diseñado para funcionar con un primario consistente en un conductor completamente aislado; este conductor usualmente es una parte componente de otro aparato, como un transformador de potencia, o el circuito de un interruptor con el cual el diseño de un TC de este tipo pueda ser coordinado

Tipo núcleo partido. Tiene el devanado secundario aislado y montado sobre el núcleo, pero no tiene devanado primario; puede estar aislado o no para tener un devanado primario. Parte de este núcleo es separable o escualizable para permitir la inclusión de un conductor primario. Este tipo es diseñado para usar con un devanado primario constituido por un conductor completamente aislado o un

conductor sin aislar operando con una tensión que esté dentro del rango del transformador.

ii. Según su conexión eléctrica.

Primario simple. Este término es usado para distinguir los transformadores que tienen un solo circuito primario de otros que tienen varios paralelo-serie circuitos primarios

Tres conductores. El arrollamiento primario son dos secciones completamente aisladas entre sí y tierra lo que les permite ser usados para medir potencia monofásica o trifásica en delta. Figura 6.

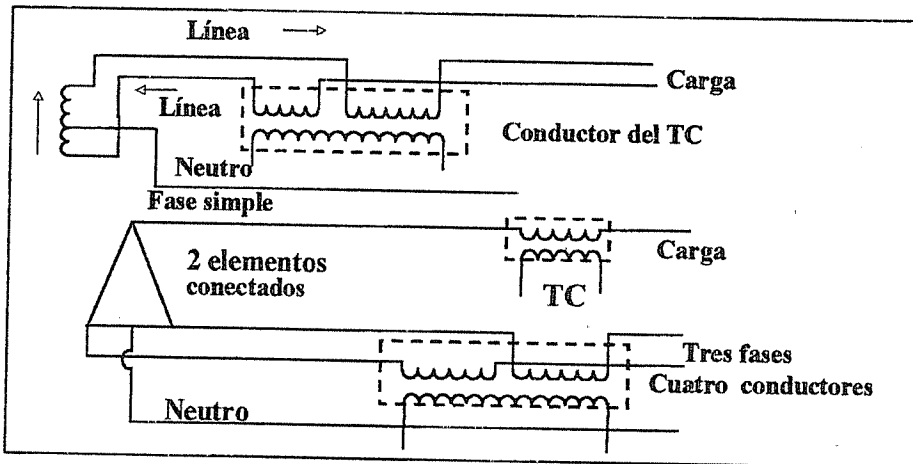


Figura 6.

La clasificación según la precisión de estos transformadores se basa en corrientes iguales en los dos primarios pero un buen diseño puede tener igual precisión con la corriente de un primario.

Primario serie-paralelo. Tiene el primario dividido en dos o mas circuitos eléctricos diferentes, arreglados para ser conectados en serie o en paralelo con el

mismo efecto de los amperios-vuelta en el secundario. El aislamiento es suficiente para conectar el primario en serie o en paralelo pero las secciones del primario no están aisladas cada una, para todo el voltaje de la línea

Secundario simple. En general, el rango normalizado de transformadores de corriente son suministrados con un devanado secundario simple diseñado para 5 amperios. Transformadores especiales pueden ser diseñados para otros rangos de corriente

Tomas secundarias. Hay aplicaciones donde es deseable tener dos o mas valores de corriente para el mismo devanado o el mismo transformador. Esta necesidad puede ser solucionada con la inclusión de un tap en el secundario o conseguir un rango segundo, el cual es un valor medio con el secundario completo

Secundario doble y triple. Cuando es deseable o necesario operar dos o más burdens separados con un transformador de corriente simple, es necesario suministrar un secundario completo y un circuito magnético para cada burden. Cada circuito magnético es energizado por un primario común

Un TC con doble secundario tiene dos circuitos magnéticos completos, uno para cada uno, y un primario común. Cada secundario funciona independientemente del otro; se usa cuando el burden es alto, o para un transformador con un gran número de relés direccionales conectados en serie. Dos secundarios conectados en serie pueden llevar el mismo burden con la misma precisión. Si un secundario no se usa puede ser cortocircuitado.

Transformadores auxiliares de corriente. Frecuentemente son usados unos pequeños transformadores de corriente. Hay unidades de bajo voltaje; la corriente secundaria del transformador principal es pasada a través del primario del transformador auxiliar. El burden de instrumentos o relevadores son conectados al transformador auxiliar.

4.2. TRANSFORMADORES DE POTENCIAL

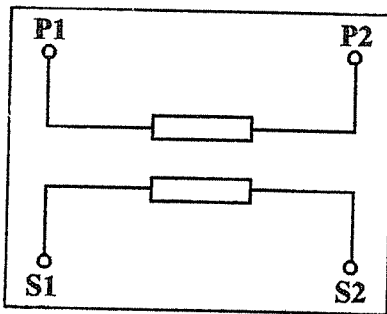
4.2.1. Generalidades

Es un transformador en el que la tensión secundaria es, en condiciones normales de operación, prácticamente proporcional a la tensión primaria, formando con ésta un ángulo cercano a 0° .

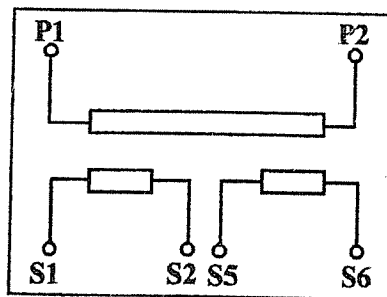
El primario en estos transformadores se conecta a los bornes entre los cuales se desea medir la tensión, y el secundario se conecta a los circuitos de tensión de uno o varios aparatos de medida, contadores, relés o aparatos análogos conectados en paralelo.

En la Figura 7. se muestran los principales modelos de los transformadores de tensión.

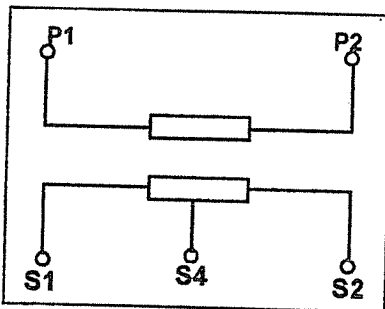
Figura 7. Principales Modelos de TPs



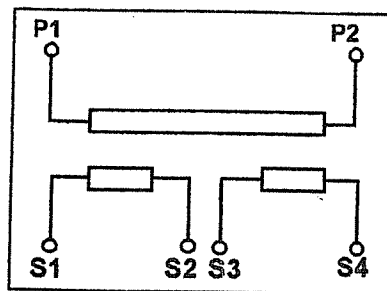
A. TP previsto para una relación de transformación.



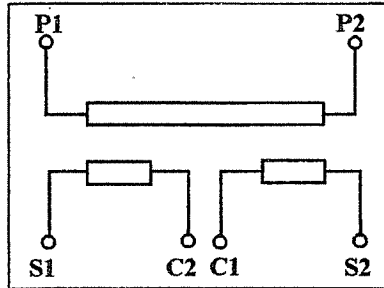
B. TP previsto para doble relación de transformación por acoplamiento serie-paralelo sobre el arrollamiento secundario.



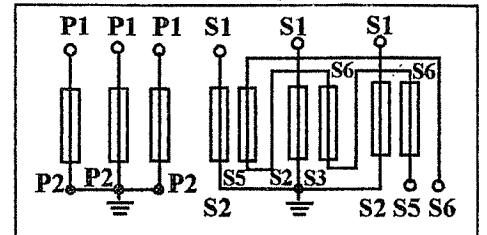
C. TP previsto para doble relación de transformación por toma doble sobre el arrollamiento secundario.



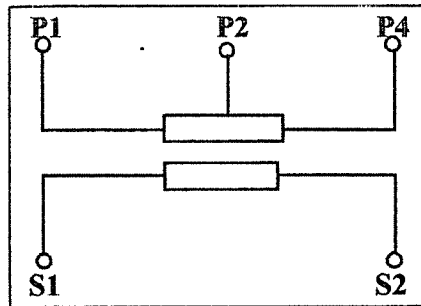
D. TP monofásico para conectar entre fase y tierra con dos arrollamientos secundarios, uno de ellos previsto para la alimentación de una señalización de tierra.



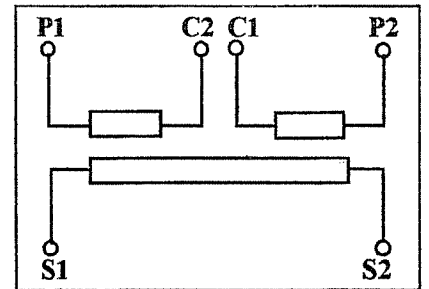
E. TP previsto para dos arrollamientos secundarios separados



F. Acoplamiento de tres transformadores representados en el esquema cuatro.



G. Transformador monofásico de doble relación de transformación por toma sobre el arrollamiento del primario. (3 bornes primarios).



H. Transformador monofásico de doble relación de transformación sobre el arrollamiento primario por acoplamiento serie-paralelo. (4 bornes primarios).

4.2.2. Teoría Clásica de Transformadores

Se sabe que todo transformador se puede representar por un esquema equivalente al siguiente:

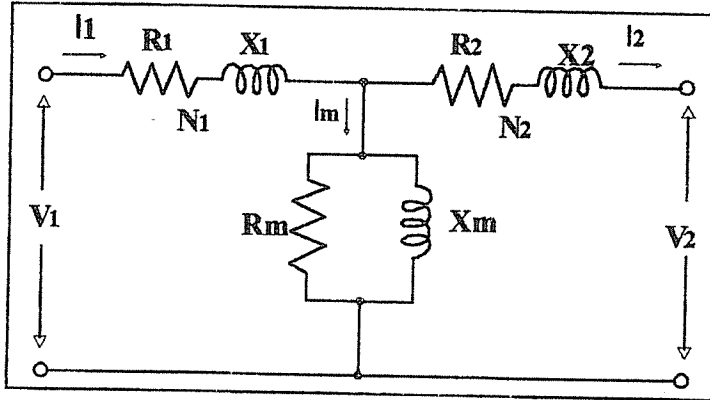


Figura 8. Circuito Equivalente de un Transformador

Las magnitudes: Tensión, intensidad e impedancia están referidas a los valores "vistos" desde un mismo lado del transformador, primario o secundario, según el caso.

R_1 y X_1 : Representan la resistencia y la reactancia de fuga primaria

R_2 y X_2 : Representan la resistencia y la reactancia de fuga secundaria

R_m y X_m : Representan la rama magnetizante; X_m consume una corriente reactiva que proporciona el flujo magnético que atraviesa el núcleo; R_m consume una corriente activa que compensa las pérdidas en el hierro (histéresis y corrientes de Foucault) del núcleo

V_1 : Tensión a la entrada

V_2 : Tensión a la salida

Según se trate de un transformador de tensión o de intensidad, los diagramas útiles a estudiar, su representación y las simplificaciones posibles son muy diferentes, por lo que las estudiaremos separadamente.

4.2.3. Diagramas Fasoriales

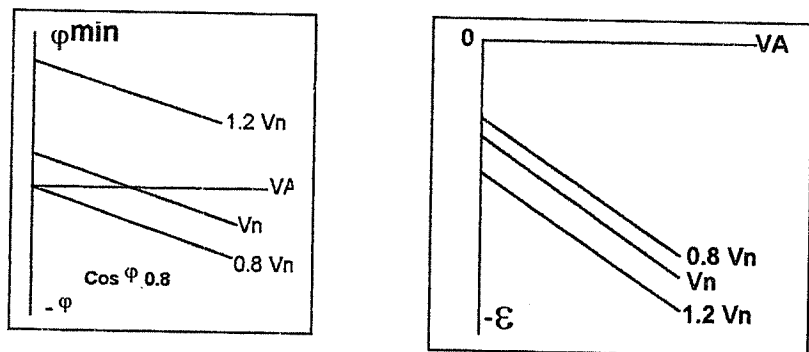
Veamos lo que sucede cuando por medio de un transformador de medida, de impedancia Z , conectado al secundario de un transformador de tensión, deseamos conocer la tensión V_1 aplicada al primario.

El error que cometemos, es decir, la diferencia vectorial entre las tensiones de salida y entrada, $V_1 - V_2$, es debida a la caída de tensión en la impedancia primaria y secundaria, de la corriente magnetizante I_0 a través de R_1 y X_1 , y a la corriente que atraviesa la carga, $I_2 = V_2/Z$, a través de $R_1 + R_2$ y $X_1 + X_2$.

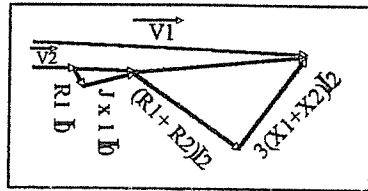
El primer término: $(R_1 + jX_1)I_0$ da lugar al error de vacío de un transformador que solo es función de la tensión de funcionamiento.

En cuanto al segundo término: $-(R_1 + R_2) + j(X_1 + X_2)I_2$ da origen a un error proporcional a la intensidad de utilización I_2 , es decir, a la carga del transformador cuyo valor relativo es independiente de la tensión. Este valor se conoce como la pendiente del transformador.

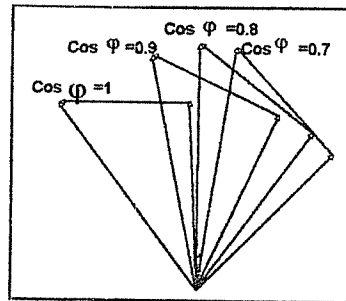
Considerando los errores de relación en % y de fase en minutos se puede entonces construir los diagramas mostrados en la Figura 9.



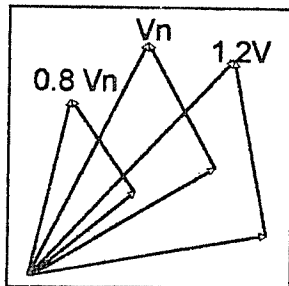
a. Errores de relación y de Fase de un T.P.



b. Diagrama de principio



c. Triángulo de vacío



d. Diagrama de Kapp

Figura 9.

El primero nos muestra el funcionamiento del transformador para una tensión dada y con una carga determinada; el segundo tiene en cuenta las variaciones de I_0 en función de la tensión y nos permite estudiar los errores de vacío del transformador, a estos últimos se añadirán los errores dados por el diagrama de Kapp, en función de las características VA y $\cos F$.

De este estudio se deducen, por consiguiente, las gráficas de errores (Figura 9a). El error de relación es, como se puede ver, siempre negativo para una relación de n número de espiras igual a la relación de tensión nominal del transformador; pero se puede centrar el transformador modificando dicha relación de número de espiras, añadiendo a los errores un avance determinado y constante.

4.2.4. Selección de los Transformadores de Potencial (ANSI C57.13)

- **Características generales**

Los factores determinantes para el estudio de estos aparatos son:

- Tipo de instalación
- Tipo de aislamiento
- La potencia y la clase de precisión

- **Instalación**

Los aparatos pueden construirse para instalaciones exteriores o interiores. Generalmente y por razones de economía, las instalaciones de baja y media tensión son de tipo interior. Los aparatos se montan de manera general en instalaciones exteriores para todas las tensiones de 60 kv en adelante.

- **Aislamiento**

Los transformadores para instalaciones interiores, se construyen bien con aislamiento de aceite y cubierta de porcelana, o bien con aislamiento de resina sintética.

Los aparatos para instalaciones exteriores se construyen generalmente con aislamiento porcelana-aceite.

- **Potencia de precisión**

La potencia nominal a elegir para los transformadores de potencial es función de la utilización a que se destina el aparato.

- **Clase de Precisión**

La elección de la clase de precisión depende de la utilización de los transformadores.

Para medidas industriales y puramente inductivas de voltímetros, la clase 3 es suficiente en la mayoría de los casos. A veces se suele emplear la clase 1, aunque se reserva para aparatos de mayor precisión.

Para las medidas de energía, se utiliza generalmente la clase 0.5, salvo en el caso de una red de gran potencia, en cuyo caso queda justificado el empleo de la clase 0.2. En este caso hay que prever contadores y cables apropiados que hagan pequeño el error total.

4.2.5. Conexión y Clase de Precisión

Los transformadores de tensión van conectados entre fases o bien entre fase y tierra.

Las conexiones entre fases se emplean generalmente en las redes de baja y media tensión.

La conexión entre fase y tierra se emplea en grupos de 3 transformadores monofásicos, conectados en estrella, en:

1. Cuando se trata de subestaciones exteriores
2. Cuando se trata de medidas de tensión y de potencia con control separado en cada una de las tres fases
3. Para alimentación de una señalización de tierra
4. Cuando el número de VA suministrado por dos transformadores de tensión es insuficiente

• Tensión Nominal de Servicio

Se elige generalmente la tensión nominal de aislamiento en KV, lo más aproximadamente posible a la tensión de servicio.

• Tensión Nominal Secundaria

La tensión nominal secundaria es generalmente de 100 o 110 V. Los transformadores de tensión se construyen generalmente con un solo arrollamiento secundario que alimenta los aparatos de medida y de protección.

Se preveen normalmente dos arrollamientos secundarios para el caso de alimentación de relés de señalización de tierra.

- **Potencia Nominal**

Para elegir la potencia nominal de un transformador de tensión, se suman las potencias nominales de todos los aparatos conectados al secundario. Se tienen también en cuenta las caídas de tensión en las líneas si las distancias entre los transformadores y aparatos de medida son grandes.

Se elige la potencia normalizada en VA inmediatamente superior a la calculada. Las potencias normalizadas son: 5 - 10 - 15 - 30 - 60 - 100 - 150 - 200 - 300 - 400 - 600.

- **Clase de precisión**

Representadas en las normas europeas por las cifras 0.05 - 0.1 - 0.2 - 0.5 - 1 y 3 corresponden al error máximo admisible en % para la tensión primaria nominal y la potencia secundaria nominal.

En la Tabla 6. aparecen las distintas clases de precisión de los instrumentos que se conectan normalmente a los transformadores y en la Tabla 7. las potencias normales para estos arrollamientos.

Tabla 6. Clase de Precisión para TPs según su uso

CLASES	UTILIZACIÓN
0.05-0.1	Medidas de contraste y laboratorio
0.2	Alimentación de contadores para redes de gran potencia
0.5	Instrumentos de medida y contadores
1	Voltímetro de cuadro y registrador Vatímetro de cuadro y registrador contador Fasímetro de cuadro y registrador Frecuencímetro de cuadro y registrador Sincronoscopio y regulador de tensión Relés de Protección Relés (solo)
3	Instrumentos de medida y protecciones cuando el número de VA en clase 1 es insuficiente y no se exige una gran precisión

4.2.6. Verificación de los Transformadores de Potencial

En forma análoga al caso de los transformadores de corriente, la norma ANSI define a la clase de precisión como el error admisible en %, que el transformador de potencial puede introducir en la medición de potencia.

La norma ANSI - C - 57.13 admite 3 clases de precisión: 0.3, 0.6 y 1.2
El error límite en la medición de una potencia está dado por:

$$E = 100 (1 - \text{FCR}) - 0.029\beta \tan \Theta$$

Si por ejemplo, el límite E es ± 0.3 , tendremos las siguientes ecuaciones para un factor de potencia del sistema de 0.6 atrasado:

$$\text{FCR} = 1.00 - 0.00039\beta$$

$$\text{FCR} = 0.997 - 0.00039\beta$$

Tabla 7. Potencias de TPs según su uso

APARATOS	CONSUMO (VA)
Voltímetros	3.5-15
Indicadores	15-25
Registadores	15-25
Vatímetros indicadores	6-10
Registadores	5-12
Fasímetros indicadores	7-20
Registadores	15-20
Contadores	3-5
Frecuencímetros indicadores	1-5
Registadores	7-15
Relés de máxima tensión	10-15
Relés temporizados de máxima tensión o intensidad	25-35
Relés selectivos	2-10
Relés direccionales	25-40
Sincronoscopios	6-25
Reguladores de tensión	30-50 150-250

Que definen a las dos líneas del paralelogramo para la clase de precisión 0.3.

Los límites deben respetarse entre 0.9 y 1.1. veces la tensión nominal, y entre vacío y la carga nominal. La tensión normalizada de las cargas es de 120 o 69.3 V. Las cargas se designan con una letra, su equivalencia en VA, y su factor de potencia. Ver Tabla 8.

Tabla 8. Designación de las cargas, su equivalencia en VA y factor de potencia

DESIGNACIÓN	VA	F.P.
W	12.5	0.1
X	25.0	0.7
Y	75.0	0.85
Z	200.0	0.85
ZZ	400.0	0.85

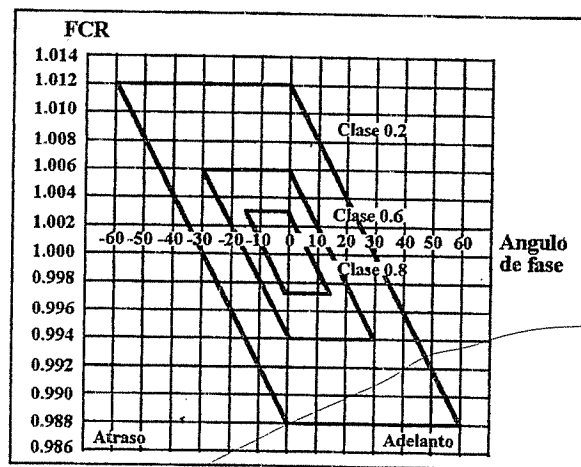


Figura 10. Clase de precisión normales para transformadores de potencial

El burden de un transformador de potencial es expresado en voltio-amperios (VA), como el producto del voltaje secundario por la corriente en amperios a través de los instrumentos conectados en paralelo en el circuito.

El burden de un transformador de potencial de un número determinado de instrumentos o relés en paralelo se calcula de la siguiente manera:

- Se halla la suma de los vatios (W) de los instrumentos y la suma de los voltamperios reactivos, para luego hallar el resultado del burden en VA por la fórmula:

$$\text{Totalburden} = \sqrt{(\text{total}W)^2 + (\text{total}VAR)^2}$$

$$\text{Factor de Potencia} = \text{Total } W / \text{Total Burden}$$

4.3. PRUEBAS A TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTOS

Antes de salir de la fábrica, todos los transformadores se someten a unas pruebas destinadas a verificar si garantizan una seguridad de funcionamiento suficiente para resistir las diversas exigencias eléctricas, mecánicas o térmicas, que pueden normalmente ocurrir en su lugar de utilización.

A continuación se presenta un resumen de las diferentes pruebas. Entre estas pruebas algunas son de rutina, que se efectúan sistemáticamente a cada transformador; otras son de prototipo, que se efectúan en aparatos modelo, y finalmente, algunas son especiales por no estar incluidas en las normas.

4.3.1. Pruebas dieléctricas (Para verificar la calidad del aislamiento)

- a. Tensión aplicada entre devanados de alta tensión y baja tensión a tierra.
- b. Tensión aplicada entre devanados de baja tensión y tierra.
- a. Tensión aplicada entre devanados de baja tensión, tales como:
 - Tensión inducida.
 - Prueba de impulso.

- Descargas parciales.
- Factor de disipación ($\text{tg } \delta$)

4.3.2. Pruebas de cortocircuito

- a. Verificación de la corriente térmica.
- b. Verificación de la corriente dinámica.
- c. Cortocircuito en los terminales secundarios de los TP.

4.3.3. Pruebas de circuito abierto

Se hacen en los transformadores de corriente.

4.3.4. Prueba de calentamiento

Elevación de la temperatura con carga real o simulada.

4.3.5. Pruebas de precisión

- a. En condiciones normales (verificación del error de relación y de fase)
- b. Para los TC para protección en condiciones anormales (verificación del índice de saturación)

4.3.6. Complementarias

- a. Polaridad.
- b. Resistencia.
- c. Corriente de excitación.
- d. Pérdidas en vacío
- e. Impedancia de cortocircuito.

4.4. ANALOGÍA ENTRE LOS TC Y LOS TP

Es importante llamar la atención sobre la analogía que hay entre los dos tipos, para comprender el funcionamiento de uno basado en el otro. En la tabla No. 9 se resume dicha analogía.

Tabla 9. Analogía entre TPs y TCs

PARÁMETROS DE COMPARACIÓN	TRANSFORMADOR DE POTENCIAL	TRANSFORMADOR DE CORRIENTE
Tensión	Constante	Variable
Corriente	Variable	Constante
La carga determina	La corriente	La tensión
Causa del error	Caída de tensión en serie	Corriente derivada en paralelo
Conexión del transformador a la línea	En paralelo	En serie
Carga secundaria aumenta	Cuando z_2 disminuye	Cuando z_2 aumenta
Conexión de los aparatos secundarios	En paralelo	En serie