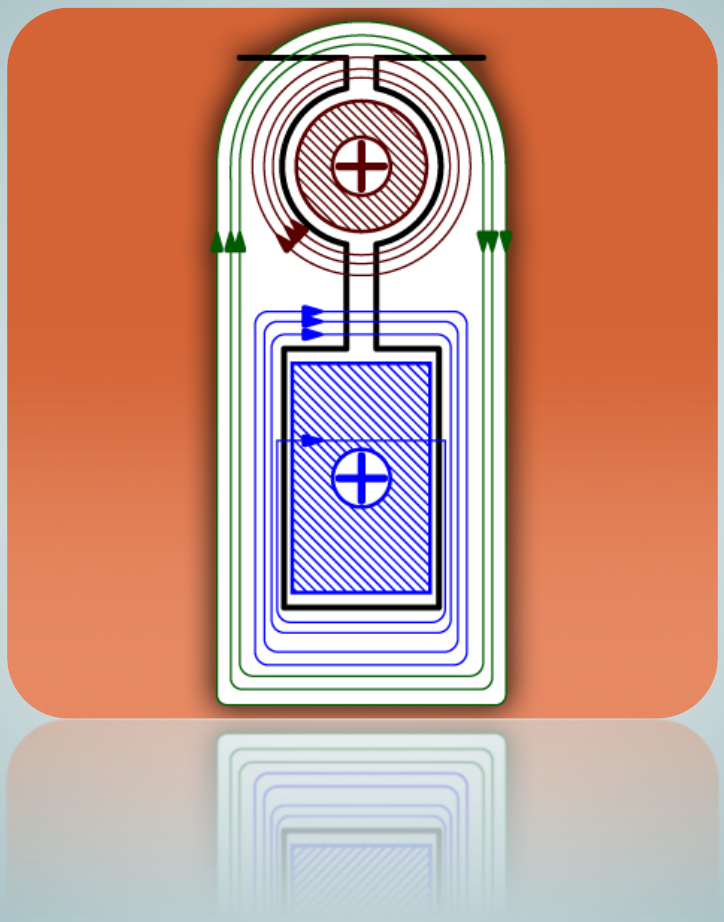
Máquinas Eléctricas II

Documentación de la práctica de laboratorio «Transformadores Trifásicos»



Miguel Ángel Rodríguez Pozueta

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

Este tema se publica bajo Licencia:
Creative Commons BY-NC-SA 4.0

© 2018, Miguel Angel Rodríguez Pozueta

Universidad de Cantabria (España)

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License. To view a copy of this license, visit http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/ or send a letter to Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

Está permitida la reproducción total o parcial de este documento bajo la licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Unported que incluye, entre otras, la condición inexcusable de citar su autoría (Miguel Angel Rodríguez Pozueta - Universidad de Cantabria) y su carácter gratuito.

Puede encontrar más documentación gratuita en la página web del autor:
http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm

PRÁCTICA DE LABORATORIO: TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

1.- INTRODUCCIÓN

En esta práctica de laboratorio se va a analizar el comportamiento de un transformador trifásico y de un banco de tres transformadores monofásicos con varias formas de conexión.

Se van a estudiar el índice horario, la forma de la corriente de vacío y los efectos de las cargas equilibradas y de las cargas desequilibradas monofásicas, conectadas tanto entre fases como entre fase y neutro.

En varios de los ensayos incluidos en esta práctica es necesario observar las formas de onda de tensiones y de corrientes, así como sus desfases, lo que requiere el manejo de un osciloscopio. Por esta razón, se incluye una explicación de cómo usar este instrumento para la visualización y medida de estas ondas.

2.- EL OSCILOSCOPIO

2.1.- Descripción y manejo

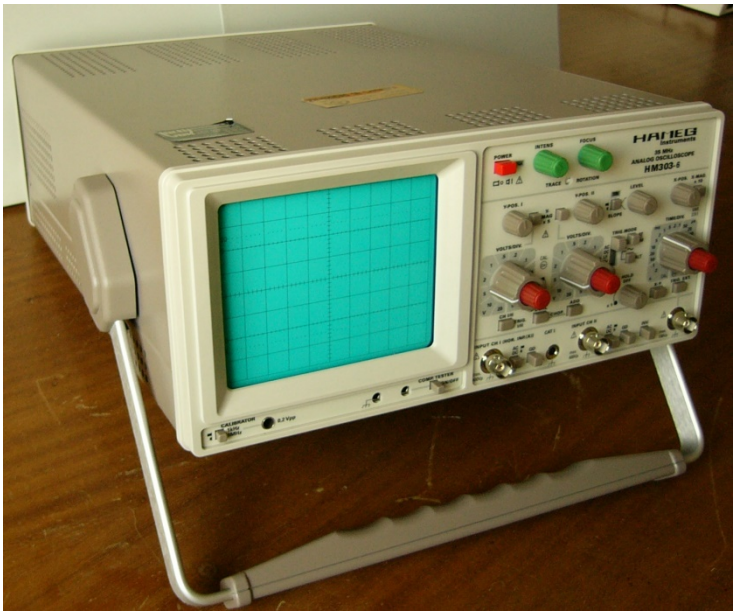


Fig. 1: Osciloscopio analógico

El osciloscopio (Fig. 1) es un instrumento que permite visualizar en una pantalla la forma de la tensión aplicada al aparato, así como medir su magnitud y su frecuencia. Existen osciloscopios *analógicos* y *digitales*.

La pantalla de un osciloscopio está dividida en cuadrículas que permiten medir el periodo y la magnitud de la tensión a la que está conectado. Un mando permite escoger la escala vertical adecuada: 20 V/div, 10 V/div, … y otro permite escoger la escala horizontal: 500 ms/div, 100 ms/div, …

La *sonda* es el accesorio por medio del cual se conecta la tensión a medir al osciloscopio. A veces se utilizan *sondas atenuadoras* que suministran al osciloscopio no la tensión a medir, sino una fracción de ésta. Así, una sonda con atenuación 1/10 suministra al osciloscopio una onda de tensión de igual forma que la que hay en bornes de la sonda, pero con su amplitud reducida a la décima parte. Hay que tener en cuenta la atenuación que introduce la sonda cuando se miden tensiones mediante un osciloscopio.

Aunque un osciloscopio está preparado para visualizar tensiones también se puede utilizar para medir y visualizar corrientes. Para ello se hace pasar la corriente por un *shunt* (es decir, una resistencia muy pequeña) cuyo valor óhmico es conocido y se visualiza en el osciloscopio la caída de tensión en bornes del shunt.

Existen *osciloscopios de doble haz* que permiten visualizar simultáneamente la forma de dos tensiones diferentes. Por lo tanto, se le conectan dos sondas y disponen de dos mandos para las escalas verticales, uno para cada tensión. Con estos osciloscopios también es posible medir el ángulo de desfase entre las dos ondas de tensión.

2.2.- Uso del osciloscopio para observar y medir magnitudes de corriente alterna

El osciloscopio es fundamentalmente un aparato de medida para electrónica. La tensión a medir o a visualizar siempre es la de un punto respecto a otro que está a la misma tensión que la masa del osciloscopio, la cual está conectada a tierra. En el caso de un osciloscopio de doble haz, el aparato muestra las tensiones de dos puntos respecto otro conectado a la masa del aparato.

En ingeniería eléctrica la mayor parte de las veces las tensiones a visualizar no lo son respecto a tierra, lo que complica la utilización del osciloscopio para medirlas u observarlas.

Una forma de conectar a un osciloscopio una tensión entre dos puntos en los que ninguno de ellos está conectado a tierra es utilizar un transformador de medida. Pero esta técnica distorsiona la forma de onda que se suministra al osciloscopio cuando la onda no es sinusoidal. La mejor solución en estos casos es utilizar *sondas optoacopladas*. Una de estas sondas transforma la tensión a medir en una señal óptica que posteriormente vuelve a transformarse en una tensión eléctrica que se suministra al osciloscopio. La tensión de entrada y la enviada al osciloscopio tienen la misma forma de onda, pero están aisladas galvánicamente por la etapa óptica intermedia. Esto permite conectar a masa un punto de la señal que llega al osciloscopio.

Sin embargo, en esta práctica de laboratorio se utilizará otro sistema que se basa en que las tensiones primaria y secundaria de un transformador están aisladas galvánicamente. Por lo tanto, una tensión del secundario del transformador que se está ensayando se podrá conectar al osciloscopio con una sonda normal (sin aislamiento galvánico entre sus señales de entrada y de salida), ya que dicha tensión está aislada a tierra y no reviste ningún problema el unir un punto del circuito secundario a la masa del osciloscopio y, por tanto, a tierra. Además, el circuito que se utilice para esta práctica estará alimentado a través de un *transformador de aislamiento*. El primario del transformador a ensayar está alimentado por el secundario del transformador de aislamiento y, por consiguiente, también está aislado de tierra y no hay problema en unir uno de sus puntos a masa y así se puede visualizar en el osciloscopio también una tensión del primario del transformador a ensayar.

En resumen, los circuitos que se van a montar en esta práctica de laboratorio estarán conectados a la red a través de un transformador de aislamiento. Esto permite usar sondas atenuadoras normales para conectar dos tensiones al osciloscopio, ambas del primario o del secundario o una del primario y otra del secundario del transformador que se ensaya. Para ello, se conecta/n a la masa del osciloscopio un punto del primario y/o un punto del secundario y respecto a dicho/s punto/s son las tensiones que se visualizan y que se conectan mediante las sondas normales.

2.3.- Uso de un osciloscopio para la medida del desfase entre dos ondas sinusoidales de igual periodo

Si se desea hallar el desfase entre dos ondas de igual periodo T (lo que equivale a que son de igual frecuencia) mediante un osciloscopio, lo que se hace es visualizarlas en el aparato y medir el número de divisiones φ_E que hay entre los máximos de ambas ondas (Fig. 2) y el número de divisiones T_E que corresponde a un ciclo de una de ellas. Luego se aplica la siguiente regla de tres:

$$\left.\begin{array}{lcl} T_E & \rightarrow & 360° \\ \varphi_E & \rightarrow & \varphi \end{array}\right\} \quad \varphi = \varphi_E \frac{360°}{T_E} \qquad (1)$$

En la fórmula (1), el desfase φ se obtiene en grados sexagesimales.

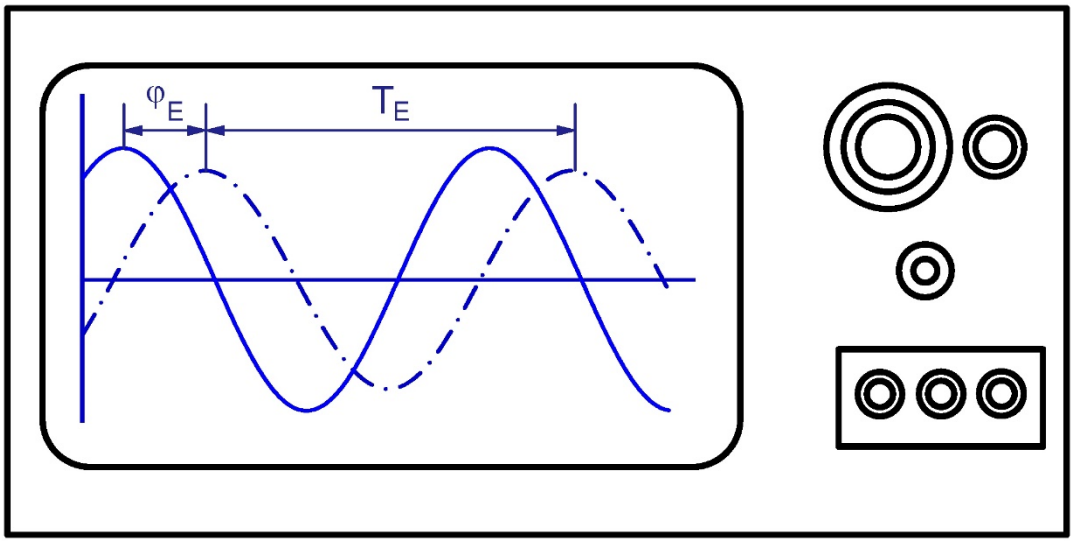


Fig. 2: Medida del desfase entre dos ondas de igual periodo
(Figura basada en la dibujada por el profesor Fernando Bustillo de la Universidad de Cantabria)

3.- DESIGNACIÓN DE UN TRANSFORMADOR

En esta práctica de laboratorio se va a seguir la norma CEI 76-4 para la ***designación de los terminales*** del primario y del secundario de un sistema de transformación de tensiones trifásico; es decir, de un transformador trifásico o de un banco trifásico formado por de tres transformadores monofásicos (véase la Fig. 3):

- Se denominan con letras mayúsculas (A, B, C, A', B', C') los terminales del lado de alta tensión y con letras minúsculas (a, b, c, a', b', c') los del lado de baja tensión.
- Los dos terminales de una misma fase están designados con la misma letra, aunque uno de ellos se denomina con la letra con apóstrofe (a y a', A y A', b y b', ...).
- Dos terminales, uno del primario y otro del secundario, sometidos a tensiones que están prácticamente en fase (recuérdese que en un transformador monofásico las tensiones primaria y secundaria están casi en fase) se designan con la misma letra, uno con mayúscula y otro con minúscula (a y A, a' y A', b y B, b' y B', ...).

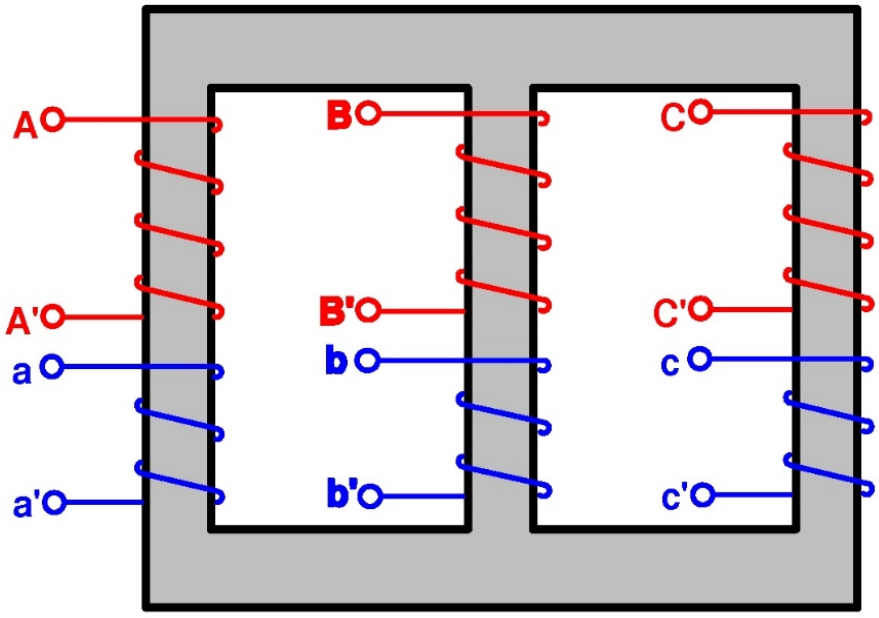


Fig. 3: Designación de los bornes de un transformador trifásico de tres columnas según la norma CEI 76-4

La ***designación de la forma de conexión*** de un transformador o de un banco trifásico se realiza por medio de dos letras y un número (por ejemplo, Yy0, Dy6, Yz11, ...). La primera letra es mayúscula e indica la forma de conexión del lado de alta tensión (A.T.), la segunda letra es minúscula e indica la forma de conexión en el lado de baja tensión (B.T.) El número indica el **índice horario**, el cual señala el ángulo de desfase entre magnitudes homólogas del lado de A.T. y del lado de B.T. medido en múltiplos de 30° y en sentido horario desde la magnitud del lado de A.T. a la del lado de B.T. Las letras que representan la forma de conexión son:

Y, y: Estrella.

D, d: Triángulo.

Z, z: Zig-zag.

Si una estrella o un zig-zag tienen su neutro unido a la red se coloca la letra N o n después de las letras Y, y, Z o z, respectivamente. Así un transformador YNd5 es un transformador estrella-triángulo con índice horario 5 en el que la estrella del lado de A.T. tiene su neutro unido a la red.

En un transformador o en un banco trifásico se pueden distinguir dos relaciones de transformación distintas: m y m_T. La **relación de transformación m** es el cociente entre las tensiones asignadas de fase del primario y del secundario:

$$m = \frac{V_{1N}}{V_{2N}} \qquad (2)$$

La **relación de transformación de tensiones m_T** es la que normalmente se proporciona como dato y es el cociente entre las tensiones asignadas de línea (fase-fase) del primario y del secundario:

$$m_T = \frac{V_{1NL}}{V_{2NL}} \qquad (3)$$

Cuando un transformador o un banco trifásico funciona en vacío, el cociente entre sus tensiones de fase primaria y secundaria es igual a la relación de transformación m y el cociente de sus respectivas tensiones de línea es igual a la relación de transformación de tensiones m_T, incluso aunque ninguna de ellas sea una de las tensiones asignadas de la máquina.

La relación que existe entre m y m_T depende de la forma de conexión del transformador o del banco de tres transformadores monofásicos. Si la forma de conexión de ambos devanados del transformador es la misma, esta relación vale 1. En caso contrario, esta relación es múltiplo de $\sqrt{3}$ o de $\frac{1}{\sqrt{3}}$.

4.- CORRIENTE DE VACÍO

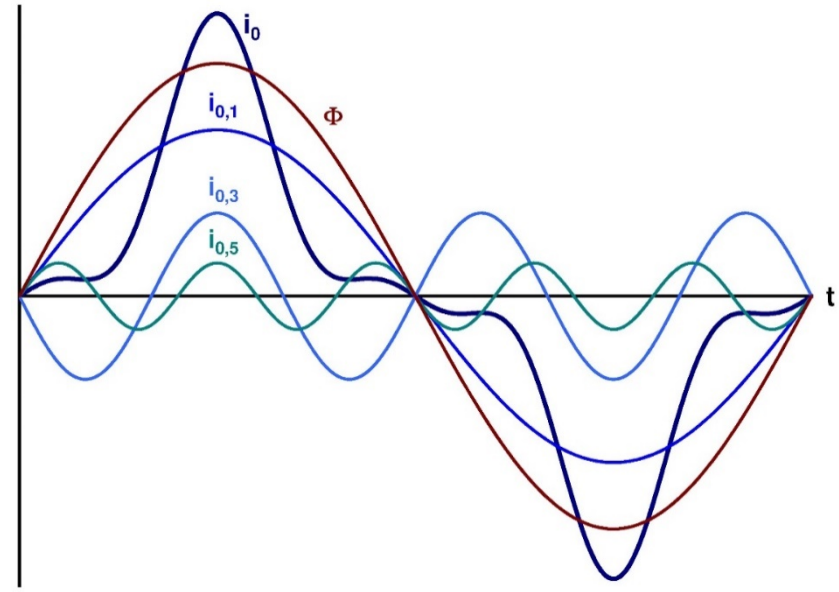


Fig. 4a: Curvas de corriente de vacío i_0 y del flujo Φ con presencia del tercer armónico en la corriente i_0

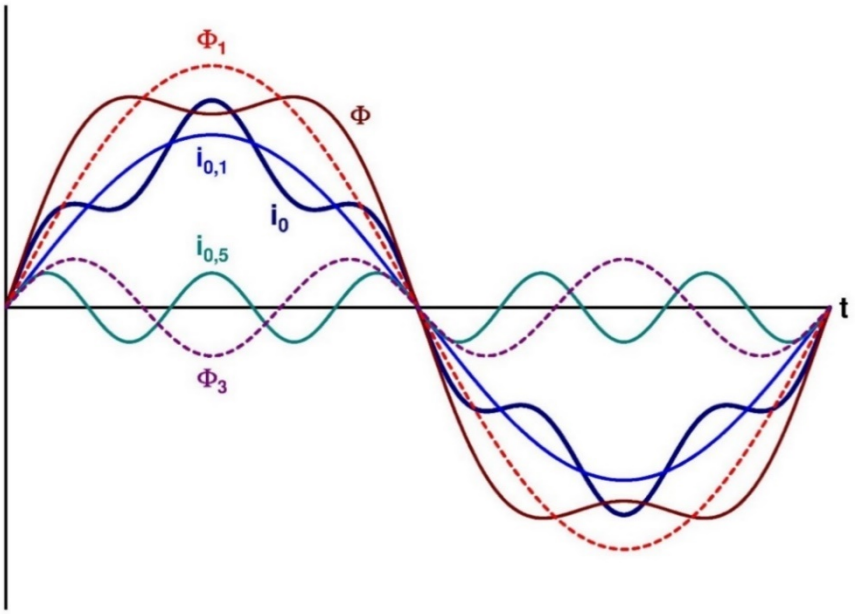


Fig. 4b: Curvas de corriente de vacío i_0 y del flujo Φ con ausencia del tercer armónico en la corriente i_0

En un transformador monofásico en vacío la corriente del primario, que en este caso es la corriente de vacío i_0, es la única que circula por el transformador y es la que genera el campo magnético de la máquina. La tensión del primario es la que proporciona la red de alimentación, por lo que se puede considerar que tiene una forma de onda en función del tiempo perfectamente sinusoidal. La saturación magnética hace que la relación del flujo Φ con la corriente de vacío i_0 no sea lineal y, en consecuencia, la corriente de vacío no es sinusoidal y presenta un tercer armónico apreciable, como se muestra en la Fig. 4a.

En el caso de una transformación de tensiones trifásica sucede que estos terceros armónicos de la corriente de vacío de las tres fases constituyen un sistema homopolar.

Por lo tanto, si la conexión del transformador trifásico o del banco de tres transformadores monofásicos permite que en vacío circulen terceros armónicos (homopolares) de la corriente -lo que sucede si el primario tiene una conexión con el neutro unido a la red y/o si la conexión en alguno de los devanados es triángulo- la corriente de vacío tendrá terceros armónicos y el flujo y las f.e.m.s de fase serán sinusoidales (Fig. 4a).

Sin embargo, si la conexión del sistema de transformación trifásico no permite la circulación de terceros armónicos de corriente –lo que sucede si en ninguno de los devanados hay una conexión triángulo y, además, en el primario la conexión es estrella o zig-zag sin su neutro unido a la red- la corriente primaria carecerá de terceros armónicos y apenas estará deformada; pero la saturación magnética hará que aparezcan terceros armónicos de flujo y de las f.e.m.s de fase, tal como se muestra en la Fig. 4b. Esto no presenta ninguna contradicción con el hecho de que las tensiones de la red de alimentación sean sinusoidales. Hay que tener en cuenta que en este caso solamente se conectan a la red las tres fases del primario, pero no el neutro. Por lo tanto, las tensiones fase-fase serán sinusoidales, pero no necesariamente será así para las tensiones de fase del primario (que son las tensiones fase-neutro). En efecto, aunque las tensiones de fase de una estrella tengan una componente homopolar, dicha componente desaparece en las tensiones fase-fase. Si la conexión de un devanado es zig-zag y el flujo tiene terceros armónicos, también las f.e.m.s de cada semidevanado del zig-zag tienen terceros armónicos (homopolares), pero la f.e.m. de una fase -que es igual a la diferencia de las f.e.m.s de los dos semidevanados que forman la fase- carece de ellos y es sinusoidal.

Cuando se trate de un transformador trifásico de tres columnas sucede que la reluctancia que presenta a los terceros armónicos de flujo (por ser homopolares) es mucho mayor que en los otros sistemas de transformación trifásicos (transformador trifásico de cinco columnas y banco de tres transformadores monofásicos). Por ello, en este caso, si la conexión no permite terceros armónicos de corriente, los terceros armónicos de flujo –y, consecuentemente, de f.e.m.- serán menores que con los otros sistemas de transformación trifásicos.

5.- PRIMER ENSAYO: TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

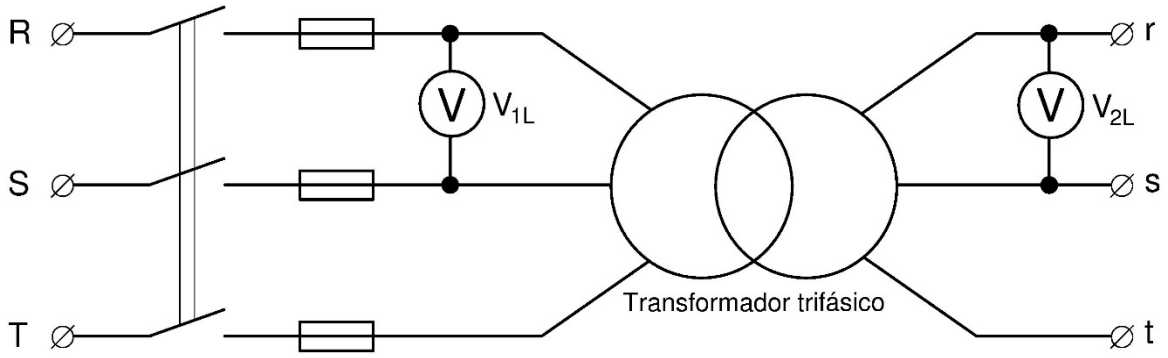


Fig. 5: Circuito utilizado para analizar experimentalmente varias conexiones de los transformadores trifásicos

El primer ensayo de esta práctica de laboratorio se realizará sobre un transformador didáctico trifásico y va a permitir el determinar el índice horario y la relación de transformación de tensiones m_T para varios tipos de conexión. El circuito a montar es el representado en la Fig. 5.

Como se ha señalado anteriormente, para poder usar un osciloscopio este circuito no se conecta directamente a la red, sino que se utiliza un transformador de aislamiento intermedio que no aparece representado en la Fig. 5.

El transformador a ensayar se alimenta por su lado de alta tensión (A.T.); es decir, su primario es el lado de A.T. y su secundario es el lado de B.T. Las conexiones que se van a ensayar son las indicadas en la Fig. 6.

Lo primero que se va a hacer es anotar en la página H.2 los valores asignados de las tensiones de fase y de la potencia del transformador a ensayar, copiándolos de su placa de características. Teniendo en cuenta que el primario es el lado de A.T., esto permite calcular la relación de transformación m mediante la fórmula (2).

Después se van a conectar los terminales del transformador de las diferentes maneras que se indican en la Fig. 6. Para cada tipo de conexión se van a medir las tensiones de línea primaria V_{1L} y secundaria V_{2L} y se van a visualizar en un osciloscopio las tensiones entre las fases R y S de la red del lado de A.T. y entre las fases homólogas r y s del lado de B.T. Para ello se conecta la masa del osciloscopio a las fases S y s y las sondas a las fases R y r.

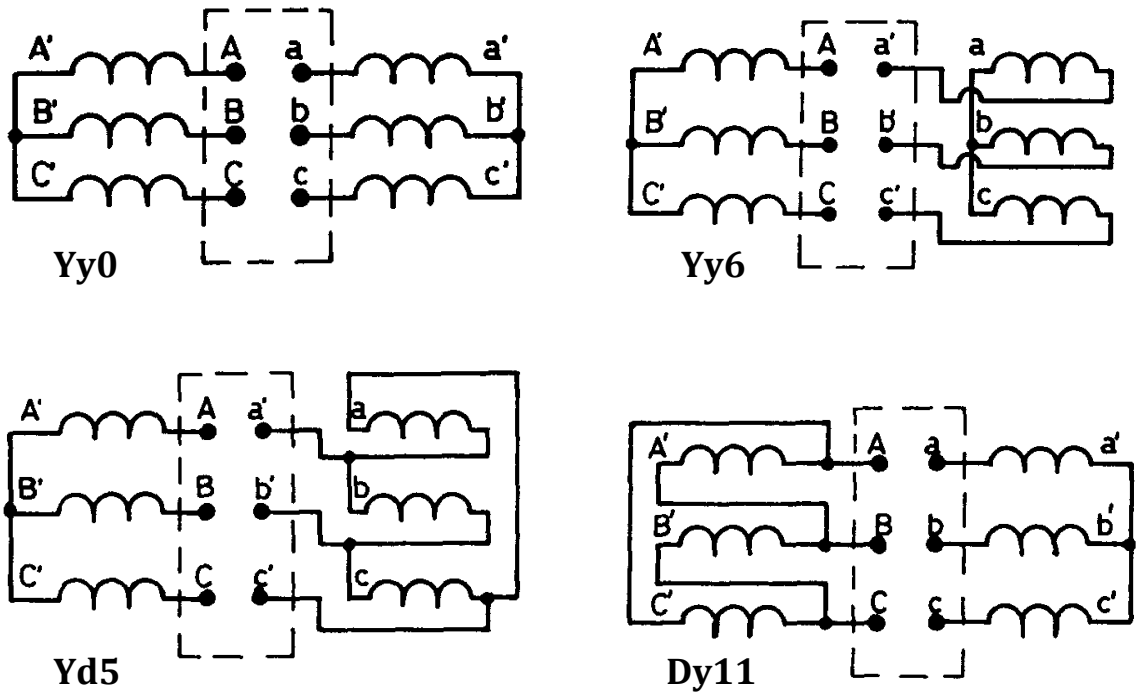


Fig. 6: Tipos de conexión a analizar

En cada tipo de conexión el cociente entre las tensiones de línea medidas, V_{1L} y V_{2L}, permite determinar la relación de transformación de tensiones m_T, ya que el transformador se ha ensayado en vacío. También se calculará el cociente entre m_T y la relación de tensiones m. Todos estos resultados se anotarán en la tabla correspondiente de la página H.2.

Por otra, parte, el desfase que se observa en el osciloscopio entre las tensiones V_{RS} y V_{rs}, medido en múltiplos de 30° desde la tensión V_{RS} a la tensión V_{rs}, permite comprobar el índice horario de la conexión.

6.- DEMÁS ENSAYOS: BANCO DE TRES TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

6.1.- Circuitos a montar para estos ensayos

Los demás ensayos de esta práctica se van a realizar sobre un banco trifásico formado por tres transformadores monofásicos. Para estos ensayos se pueden usar dos circuitos (Figs. 7 y 8), según de los aparatos de medida de que se disponga. En ambos casos, como ya se ha indicado anteriormente, para poder emplear un osciloscopio los circuitos se alimentan a través de un transformador de aislamiento que no aparece representado en las Figs. 7 y 8.

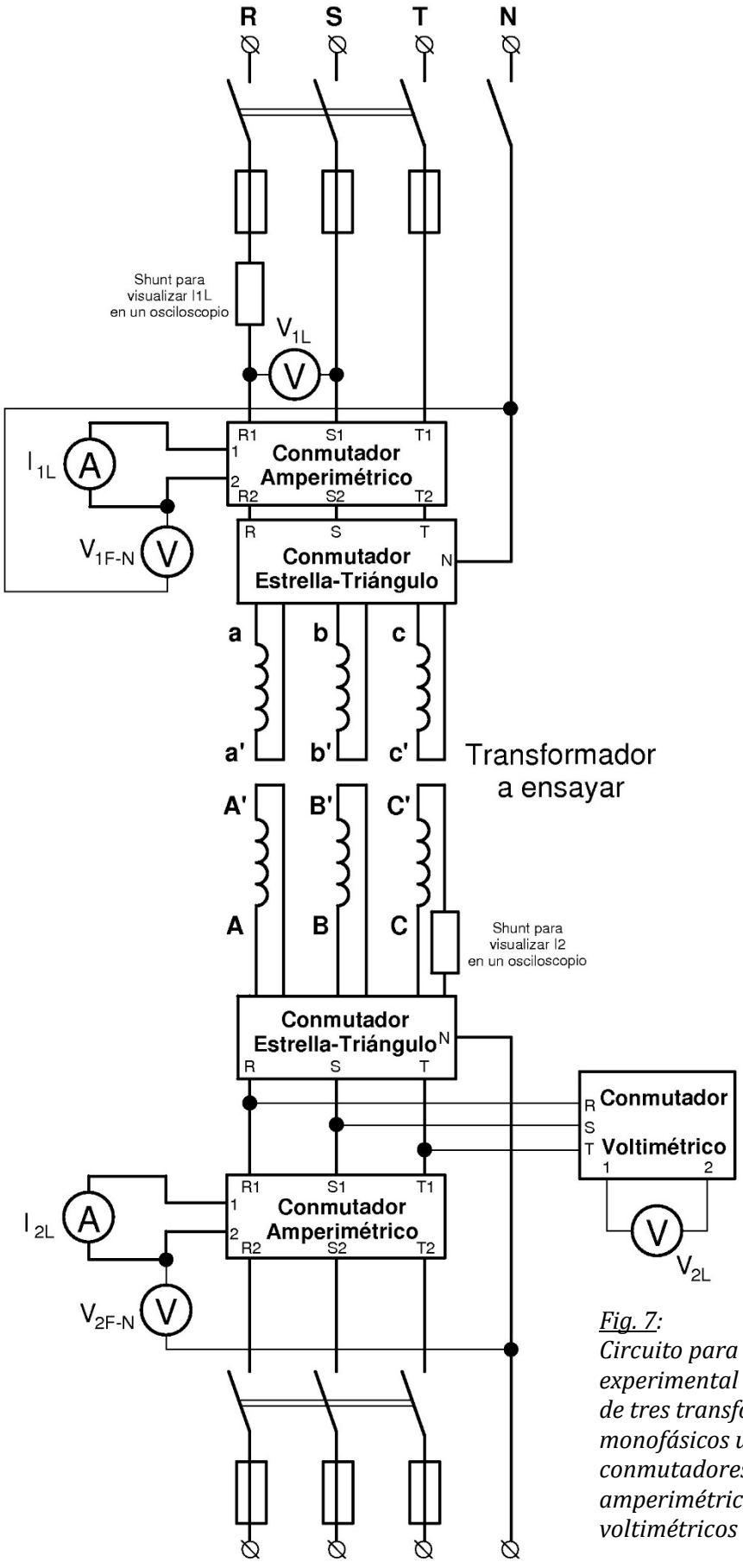
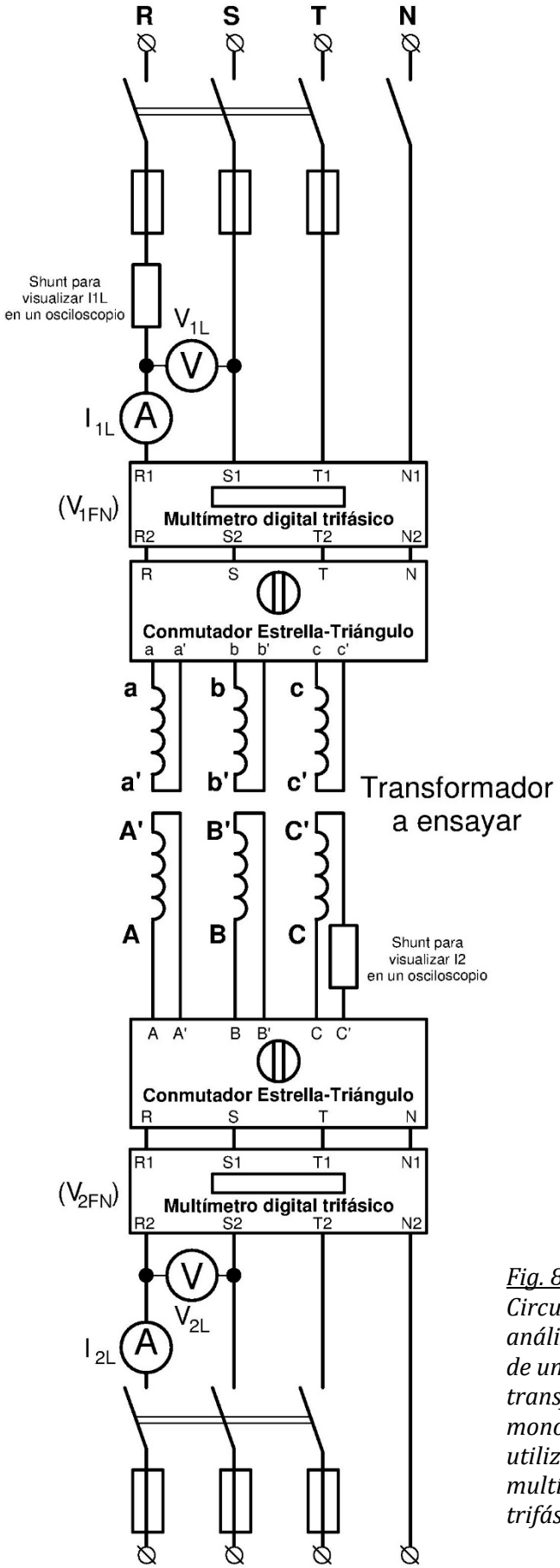


Fig. 7:
Circuito para el análisis experimental de un banco de tres transformadores monofásicos utilizando conmutadores amperimétricos y voltimétricos

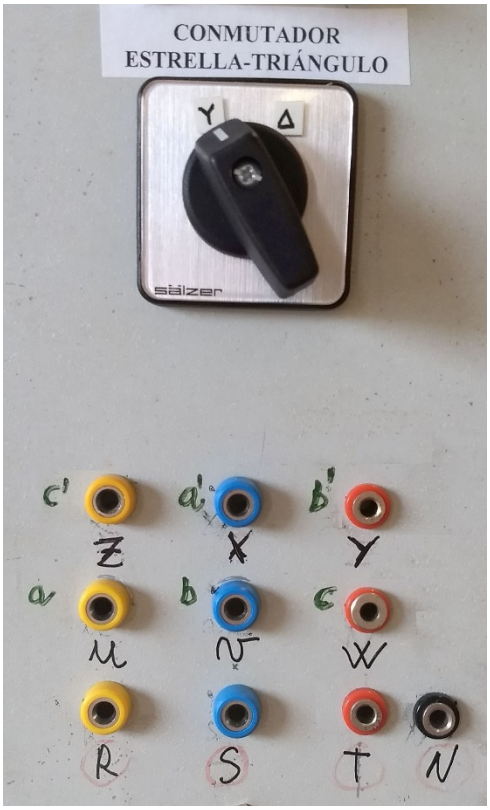


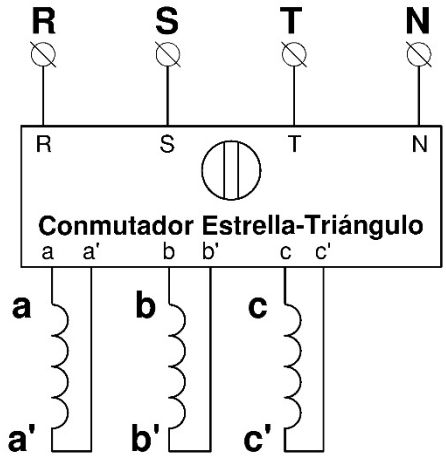
<u>Fig. 8</u>:
Circuito para el análisis experimental de un banco de tres transformadores monofásicos utilizando multímetros digitales trifásicos

En ambos circuitos (Figs. 7 y 8) hay dos interruptores trifásicos, uno para conectar el circuito primario del banco de transformadores a la red y el otro para conectar cargas a su secundario. Nótese que en el interruptor trifásico del primario únicamente actúa sobre las tres fases. Hay un interruptor monofásico independiente para conectar el neutro.

También hay dos shunts en ambos circuitos, los cuales van a permitir visualizar corrientes en un osciloscopio. El shunt del primario va a permitir visualizar una corriente de línea (la de la fase R) y el shunt del secundario servirá para visualizar una corriente de fase del secundario.

(a)





(b)

Fig. 9:
*Módulo con un conmutador estrella-triángulo **(a)** y conexión del primario de un banco de tres transformadores monofásicos a uno de estos conmutadores **(b)***

Tanto en el primario como en el secundario hay sendos **conmutadores estrella-triángulo** (o, abreviadamente, **conmutadores Y-Δ**) (Fig. 9). A uno de estos conmutadores de levas se conectan los terminales de las tres fases (dos terminales por fase) de un lado del banco de transformadores y las tres fases de la línea correspondiente. Este conmutador tiene dos posiciones; en una de ellas las tres fases del banco se conectan en estrella y en la otra en triángulo. En algunos modelos también existe una tercera posición (la posición 0) en la que el banco de transformadores se desconecta de la línea correspondiente.

En esta práctica se van a utilizar unos conmutadores Y-Δ modificados en los que también es accesible el neutro cuando el conmutador está en la posición estrella. Hay que tener cuidado en desconectar de la red este borne del neutro cuando el conmutador está en la posición triángulo, pues se puede producir un cortocircuito. En esta práctica esto no es un problema, pues el primario va a estar siempre en estrella y solamente se va a utilizar la conexión triángulo en el secundario cuando la máquina esté en vacío (tendrá el interruptor trifásico del secundario abierto) y, por consiguiente, sin tener ninguna carga conectada al neutro y ni a las tres fases del lado secundario del banco de transformadores.

En las Figs. 7 y 8 se ha dibujado la situación en que se ha conectado el lado de B.T. del banco de transformadores a la red; es decir, cuando el primario es el lado de B.T. y el secundario es el lado de A.T. Según el ensayo que se realice habrá que conectar el banco de esta manera o a la inversa. Esta inversión de las conexiones se realiza en los conmutadores estrella-triángulo, intercambiando entre ellos los cables que les llegan de las fases de los lados de A.T. y de B.T. del banco de transformadores, respectivamente.

En ambos circuitos (Figs. 7 y 8) es necesario medir las tres corrientes de línea y las tres tensiones fase-neutro de la red, tanto en el primario como en el secundario. En el secundario también es preciso medir las tres tensiones de línea (fase-fase) de la red, mientras que en el primario basta con medir solamente una tensión de línea, ya que está conectado a la red del laboratorio, la cual está equilibrada.

En el circuito de la Fig. 7 las tres corrientes del primario se miden con un solo amperímetro conectado a un **conmutador amperimétrico** (Fig. 10). Análogamente se miden las tres corrientes del secundario. Un conmutador amperimétrico es un conmutador de levas que se conecta, por un lado, al amperímetro y, por otro lado, a la red de forma que es atravesado por las tres corrientes a medir. El conmutador tiene tres posiciones R, S y T. En la posición R las corrientes de las fases S y T de la red circulan directamente y la de la fase R se envía al amperímetro. Análogamente sucede en las posiciones S y T. Algunos de estos conmutadores tienen también una posición 0 en la que las tres corrientes circulan directamente y no se envía ninguna de ellas al amperímetro. Por lo tanto, para medir las tres corrientes del primario o las tres corrientes del secundario, habrá que mover el mando del conmutador amperimétrico correspondiente y anotar la lectura del amperímetro en cada una de sus posiciones.

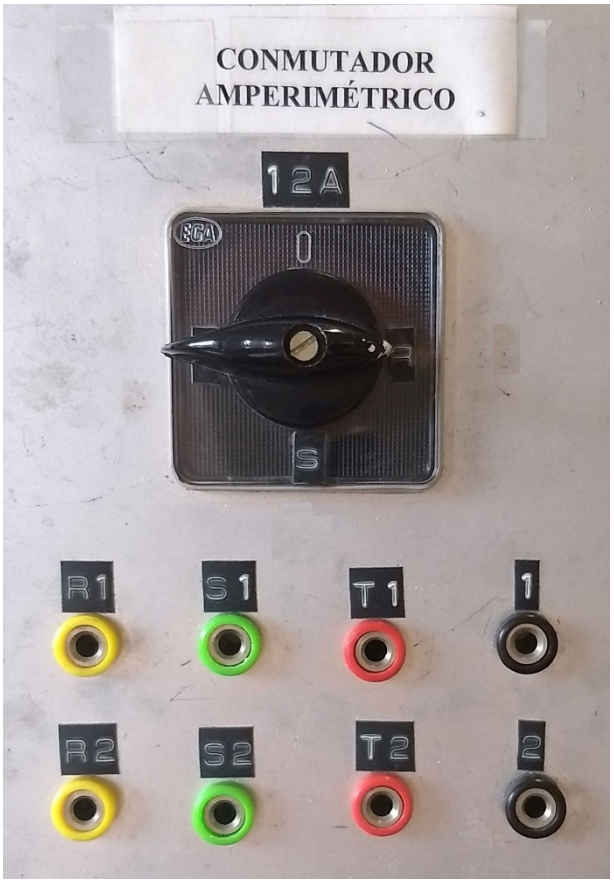


Fig. 10:
Módulo con un conmutador amperimétrico

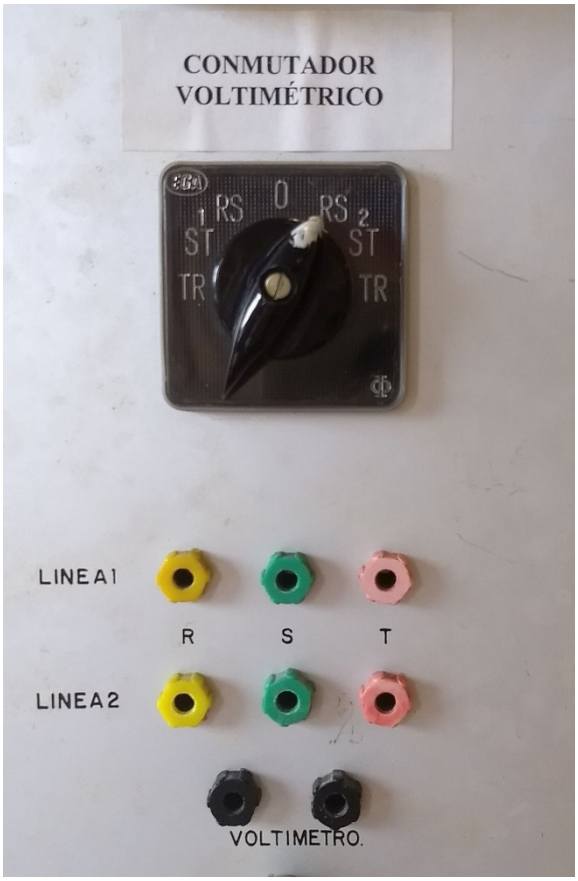


Fig. 11:
Módulo con un conmutador voltimétrico

En el circuito de la Fig. 7 también se han conectado sendos voltímetros entre uno de los terminales de los amperímetros (que están conectados a conmutadores amperimétricos) y el borne neutro del conmutador estrella-triángulo respectivo. De esta manera, uno de estos voltímetros mide en cada momento la tensión fase-neutro correspondiente a la fase que el conmutador amperimétrico envía al amperímetro. Esto permite que con el conmutador amperimétrico y un único voltímetro se midan las tres tensiones fase-neutro correspondientes.

Además, en la Fig. 7 aparece también un **conmutador voltimétrico** (Fig. 11) conectado, por una parte, a las tres fases del secundario y, por otra, a un voltímetro. Este conmutador de levas posee tres posiciones RS, ST y TR, lo que permite seleccionar cuál de las tensiones compuestas (fase-fase) es medida por el voltímetro. Algunos de estos conmutadores tienen también una posición 0 en la que no se envía ninguna tensión al voltímetro.

El conmutador voltimétrico de la Fig. 11 es algo diferente a lo explicado hasta ahora, pues sirve para medir con un único voltímetro las tensiones compuestas de dos líneas trifásicas distintas. Por lo tanto, además de la posición 0, posee 6 posiciones: RS, ST y TR de la línea 1 y RS, ST y TR de la línea 2.

Al utilizar los conmutadores amperimétricos y voltimétricos hay que tener cuidado de no dejarlos nunca en la posición 0 durante un ensayo. En efecto, con uno de estos conmutadores en la posición 0, el aparato de medida -amperímetro o voltímetro- correspondiente indica un valor cero y esto puede inducir a error y hacer creer que el circuito está sin tensión o sin corriente cuando en realidad no es así, lo cual es peligroso.

(b)

Fig. 12:
*Módulo con un multímetro digital trifásico **(a)** y multímetro usado en dicho módulo **(b)***

El circuito mostrado en la Fig. 8 es el más adecuado para esta práctica de laboratorio si se dispone de dos **multímetros digitales trifásicos** (ver la Fig. 12).

Un multímetro digital trifásico se conecta de forma que es atravesado por las corrientes de las tres fases a medir y recibe las tensiones de las tres fases y del neutro. En muchos casos es necesario que las corrientes se suministren al aparato mediante transformadores de intensidad.

Uno de estos multímetros posee una pantalla LCD o de diodos LED y varios pulsadores (Fig. 12). Mediante estos pulsadores se elige la magnitud y la fase a medir en cada caso. Así pues, mediante uno solo de estos aparatos se pueden medir las tres corrientes, las tres tensiones fase-fase y las tres tensiones fase-neutro de la red a la que está conectado. Normalmente estos aparatos miden también otras magnitudes: frecuencia, potencias activa, reactiva y aparente, factor de potencia, energía, …

En el circuito de la Fig. 8 también se han añadido un amperímetro y un voltímetro que miden, respectivamente, una de las corrientes de línea y una de las tensiones fase-fase del primario. En principio, estos aparatos de medida no serían necesarios, ya que se dispone de un multímetro trifásico en el primario. Sin embargo, se han colocado estos aparatos de medida para poder vigilar de forma continuada la corriente y la tensión primarias, independientemente de los ajustes del multímetro. De todos modos, en este circuito todas las medidas que requieran los ensayos se realizarán con los multímetros digitales trifásicos.

Antes de empezar los ensayos que se van a realizar con estos circuitos (Figs. 7 y 8) se anotarán en la página H.2 los valores asignados de tensión, de corriente y de potencia de uno de los transformadores monofásicos del banco trifásico.

En todos los ensayos que se describen a continuación, el conmutador estrella-triángulo del primario permanecerá siempre en su posición estrella.

Los dos shunts de los circuitos de las Figs. 7 y 8 se mantendrán cortocircuitados mediante sendos puentes que solo se quitarán en el momento en que los shunts se usen para visualizar corrientes en el osciloscopio. Especialmente, los shunts deberán estar cortocircuitados en el momento en que se estén midiendo los valores eficaces de las tensiones y de las corrientes. Esto se hace así para evitar que los shunts tengan que soportar corrientes elevadas y, sobre todo, para eliminar el pequeño desequilibrio entre las tres fases debido a ellos.

De hecho, dado que a partir de ahora los shunts solamente son necesarios en el segundo ensayo (funcionamiento en vacío), una vez terminado éste van a permanecer permanentemente cortocircuitados o, directamente, se desconectarán del circuito.

6.2.- Segundo ensayo: funcionamiento en vacío

Para este ensayo el banco de tres transformadores monofásicos tiene que estar conectado como se muestra en las Figs. 7 y 8; es decir, con el lado de baja tensión (B.T.) conectado al primario y el lado de alta tensión (A.T.) conectado al secundario. Se hace así para que el primario, que está siempre conectado en estrella, funcione a su tensión asignada y, por consiguiente, la máquina esté saturada y se puedan apreciar bien los terceros armónicos de la corriente de vacío y/o de las f.e.m.s

Durante todo el ensayo el interruptor del secundario va a permanecer abierto y las medidas y los cálculos posteriores que se realicen se anotarán en la tabla correspondiente de la página H.2. Evidentemente, en vacío la corriente secundaria será siempre nula y no hace falta medirla.

En el funcionamiento en vacío todas las magnitudes de corriente y de tensión, tanto del primario como del secundario, van a ser equilibradas. Por esta razón, bastará con medir una sola de cada una de estas magnitudes y no las de las tres fases.

Se va a ensayar el banco en vacío con cuatro tipos de conexión. Al principio el conmutador estrella-triángulo del secundario va a estar en la posición estrella; luego las dos primeras conexiones del banco de transformadores van a ser estrella-estrella. En un caso la estrella primaria tendrá su neutro unido al de la red -para lo cual se cerrará el interruptor monofásico del neutro primario en las Figs. 7 y 8- y en el otro se abrirá dicho interruptor monofásico y el neutro primario estará aislado de la red eléctrica.

En estas dos primeras conexiones del banco el osciloscopio va a visualizar la corriente primaria y una tensión de fase (fase-neutro) del primario (en su lugar también podría usarse una tensión de fase del secundario). Para ello se va a conectar uno de los extremos del shunt primario a la masa del osciloscopio y las sondas se conectan al otro extremo del shunt primario y al neutro primario del banco; es decir, al borne neutro del conmutador Y-Δ del primario. Realmente, de esta manera la tensión fase-neutro se introduce invertida al osciloscopio (se introduce la tensión neutro-fase), pero esto no importa para observar si tiene o no tiene un tercer armónico. Además, si se desea, el osciloscopio tiene una tecla que invierte la onda visualizada en su pantalla.

Se observará que cuando el neutro primario está unido a la red, la corriente de vacío se deforma y tiene un tercer armónico apreciable y la f.e.m. de fase es sinusoidal. Al desconectar el neutro primario de la red, la corriente no puede tener un tercer armónico (homopolar) y es mucho más sinusoidal, pero la fuerza electromotriz (f.e.m.) de fase se deforma y ahora tiene un tercer armónico. Esto hace que los valores eficaces de la corriente de vacío y de las f.e.m.s de fase, tanto primaria como secundaria, se modifiquen cuando el neutro se desconecta de la red. Sin embargo, las tensiones fase-fase primaria y secundaria no cambian.

En los otros dos estados que se van a estudiar la conexión del banco de transformadores va a ser estrella-triángulo y se obtienen poniendo el conmutador Y-Δ del secundario en la posición triángulo, por lo que ahora la tensión de fase secundaria es la fase-fase (y no se precisará medir la tensión fase-neutro del secundario, por lo que no se usarán las celdas correspondientes de la tabla de la página H.2). Ahora el osciloscopio va a mostrar la corriente y la tensión de fase del triángulo secundario (también valdría sustituirla por una tensión de fase del primario). Para ello, se conecta a la masa del osciloscopio el extremo del shunt que está unido al terminal C del secundario del banco y las sondas al otro extremo del shunt y al terminal A del banco de transformadores.

Se observa que, tanto si el neutro del primario está conectado como si está desconectado de la red de alimentación, la tensión de fase del secundario (que ahora es una tensión fase-fase por estar conectado en triángulo) es sinusoidal y por las fases del secundario circula una corriente con solo un tercer armónico (es decir, con un periodo igual a la tercera parte del periodo de la onda de la tensión de fase). Aunque no se está visualizando la corriente primaria, sabemos que cuando el neutro está aislado carecerá terceros armónicos, pero la corriente de tercer armónico que circula por el interior del triángulo secundario evita que el flujo y las f.e.m.s de fase tengan terceros armónicos. Cuando el neutro esté conectado a la red, la corriente primaria podrá tener un pequeño tercer armónico, pero la corriente interna del triángulo apenas cambiará y será ella la que fundamentalmente evite los terceros armónicos de flujo y de f.e.m. Esto hace que los valores eficaces de todas las tensiones que se miden no presenten variaciones cuando el neutro pase de estar conectado a estar desconectado de la red y solo se aprecia una ligera variación en el valor eficaz de la corriente de vacío.

6.3.- Tercer ensayo: funcionamiento con cargas equilibradas

Para este ensayo el circuito se deja como quedó al final del ensayo anterior. Es decir, el lado de baja tensión (B.T.) del banco será el primario y el lado de alta tensión (A.T.) será el secundario y el banco de transformadores tendrá la conexión estrella-triángulo, pues el conmutador Y-Δ del secundario se dejará en la posición triángulo. El neutro del primario estará unido a la red por lo que se deberá mantener cerrado el interruptor monofásico del neutro primario durante todo este ensayo.

En este ensayo todas las magnitudes de corriente y de tensión, tanto del primario como del secundario, van a ser equilibradas. Por esta razón, bastará con medir una sola de cada una de estas magnitudes y no las de las tres fases.

Las medidas que se efectúen en este ensayo se anotarán en la tabla correspondiente de la página H.3.

En este ensayo se van a medir las corrientes y las tensiones de línea (fase-fase) del primario y del secundario y la tensión de fase (fase-neutro) del primario (como la conexión secundaria es triángulo, no se mide la tensión fase-neutro del secundario; por lo tanto, no se tendrá que rellenar la última columna de la correspondiente tabla de la página H.3). La máquina se va a ensayar en varios estados: cuando está en vacío y cuando se le conectan cargas equilibradas resistivas, inductivas y capacitivas. Se procurará que estas cargas consuman corrientes similares (ya que así, solamente se modifica el factor de potencia de la carga, cuya influencia es lo que se quiere analizar en este ensayo). Estas cargas se irán conectando sucesivamente al banco a través del interruptor trifásico del secundario. Para ello se usarán los terminales de fase de este interruptor, pero teniendo cuidado de nunca conectar nada al neutro secundario.

Mediante los resultados de este ensayo se podrá comprobar como varía el valor eficaz de la tensión secundaria con respecto a la de vacío cuando se modifica el factor de potencia de la carga.

6.4.- Cuarto ensayo: funcionamiento con cargas desequilibradas monofásicas

En este ensayo el banco de transformadores va a tener la conexión estrella-estrella, por lo que los dos conmutadores Y-Δ de los circuitos de las Figs. 7 y 8 estarán en su posición estrella. Para evitar que las cargas que se van a utilizar se encuentren a una tensión demasiado elevada, en este ensayo se invierten las conexiones con respecto a todos los anteriores y ahora el lado de A.T. del banco de transformadores se conecta al primario y el lado de B.T. al secundario.

Durante este ensayo el banco de transformadores va a estar desequilibrado y, por lo tanto, será preciso medir las corrientes y las tensiones de las tres fases del secundario y del primario, excepto las tensiones de línea (fase-fase) del primario, que solo se miden en una fase. Esto es así porque estas tensiones son las que le proporciona la red de alimentación, la cual es equilibrada. Las medidas que se realicen durante este ensayo se anotan en la tabla correspondiente de la página H.3.

Al principio se deja abierto el interruptor secundario del banco y se miden las tensiones y corrientes del banco en vacío, tanto cuando el neutro primario está aislado como cuando está unido a la red, para lo cual se utiliza el interruptor monofásico del primario.

Luego se va a conectar en el secundario del banco una carga monofásica consistente en un reóstato variable. Primero se conectará entre una fase y neutro a la salida del interruptor secundario y luego entre dos fases. Para cada una de estas dos formas de conectar esta carga monofásica se medirán las magnitudes de tensión y corriente del primario y del secundario del banco, tanto cuando el neutro primario está aislado como cuando está unido a la red. En todos estos estados de carga se ajustará el reóstato para que circule por él una corriente cuyo valor eficaz esté comprendido entre $^1/_4$ y $^1/_3$ de la intensidad secundaria asignada de uno de los transformadores monofásicos del banco. Evidentemente, esta corriente no debe ser superior a la que es capaz de soportar el reóstato.

Al observar todas las medidas efectuadas en carga y compararlas con las efectuadas en vacío se aprecia que, cuando la carga se conecta entre fase y neutro del secundario y el neutro primario está aislado, las tensiones de fase primarias y secundarias de los dos

transformadores sin carga del banco aumentan apreciablemente, sobre todo en uno de ellos. Esto puede resultar peligroso y, por esta razón, no se deben conectar cargas monofásicas fase-neutro en bancos de transformadores y en transformadores trifásicos con la conexión estrella-estrella y con el neutro primario aislado. Cuando el neutro primario está unido a la red o cuando la carga monofásica se conecta entre fases no existe este problema.

7.- BIBLIOGRAFÍA

[1] AVTGIS, COUGHLIN y LOOMOS. *Manual de laboratorio para circuitos eléctricos*. Marcombo. Barcelona. 1976.

[2] CHAPMAN. *Máquinas eléctricas*. McGraw-Hill Interamericana. Madrid. 2005.

[3] CORRALES MARTIN. *Cálculo Industrial de máquinas eléctricas (2 tomos)*. Marcombo. Barcelona. 1982.

[4] DPTO. TÉCNICO DISTESA. *Manuales Distesa: Máquinas II*. DISTESA. Madrid. 1976.

[5] EQUIPO EPS ZARAGOZA. *Tecnología de Electricidad 4 instalaciones y líneas*. EDEBE. Barcelona. 1981.

[6] FRAILE MORA y GARCÍA GUTIÉRREZ. *Prácticas de Electrotecnia*. Dpto. de Publicaciones de la E.T.S.I.C.C.P. de Madrid.

[7] FRAILE MORA. *Máquinas eléctricas (7ª edición)*. Ibergarceta Publicaciones, S.L. Madrid. 2015.

[8] GURRUTXAGA. *El fenómeno electromagnético Tomo IV. Las máquinas eléctricas II.* Dpto. de publicaciones de la E.T.S.I.C.C.P. de Santander 1985.

[9] PALACIOS BREGEL. *Prácticas de Laboratorio de Máquinas Eléctricas*. Paraninfo. Madrid. 1977.

[10] RAS OLIVA. *Transformadores de potencia, de medida y protección*. Ed. Marcombo. Barcelona. 1998.

[11] SALAZAR. *Ingeniería eléctrica experimental*. Ed. Marcombo. Barcelona. 1973.

[12] SANZ FEITO. *Máquinas eléctricas*. Pearson Educación. Madrid. 2002.

Seguidamente se incluyen las “Hojas de la práctica” que hay que llevar al laboratorio durante la ejecución de la práctica, ya que facilitan su realización. En ellas se anotan las medidas realizadas en el laboratorio, los cálculos posteriores y las observaciones pertinentes.

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA Y ENERGETICA

Práctica de Laboratorio: TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

ASIGNATURA _____

Nombre del alumno _____

Fecha de realización de la práctica _____ Grupo de prácticas: _____

Referencias de los transformadores utilizados:

- Transformadores monofásicos: _____ , _____ , _____
- Transformador trifásico de tres columnas: _____

****

Características de los aparatos de medida empleados:

Tipo de aparato	Magnitud que mide	Referen-cia	Sistema indica-dor	Clase de precisión	Alcances	Nº de divisiones de la escala	Ctes. de medida

(Las magnitudes en negrita se obtienen experimentalmente en el laboratorio. Las magnitudes sin negrita se obtienen posteriormente por cálculo)

Magnitudes asignadas de los transformadores utilizados

	Transformador trifásico de tres columnas	*Uno de los transformadores monofásicos del banco*
S_N (VA)		
V_{ATN} (V)		
V_{BTN} (V)		

Relaciones de transformación para diversas conexiones del transformador trifásico

$m = V_{1N} / V_{2N}$ = _____ / _____ = _____

Conexión				
V_{1L} (V)				
V_{2L} (V)				
$m_T = V_{1L}/V_{2L}$				
m_T/m				

Funcionamiento en vacío

Banco de tres transformadores monofásicos:

Conexión				
I_{0L} (A)				
V_{1L} (V)				
V_{1FN} (V)				
V_{2L} (V)				
V_{2FN} (V)				
Magnitudes con 3º armónico				

Caídas de tensión debidas a cargas equilibradas

Conexión: _____

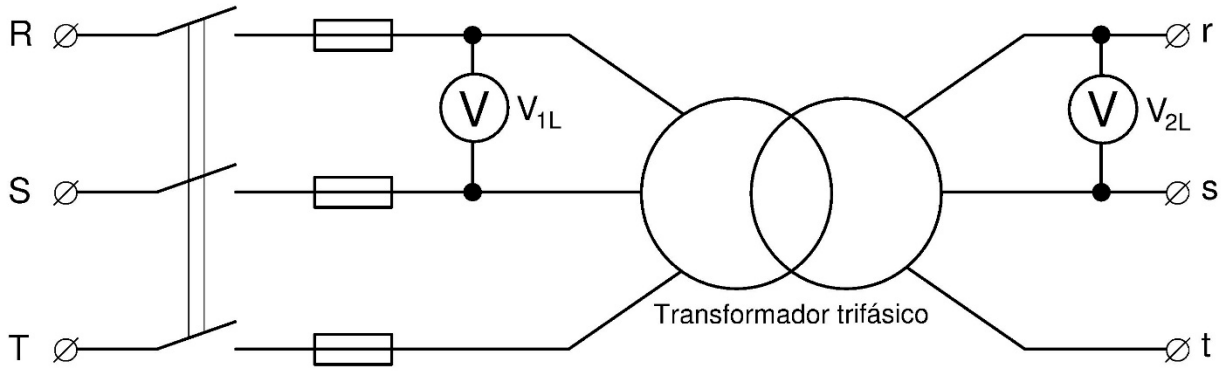
	I_{1L} (A)	V_{1L} (V)	V_{1FN} (V)	I_{2L} (A)	V_{2L} (V)	V_{2FN} (V)
Vacío						
Carga resistiva						
Carga inductiva						
Carga capacitiva						

Efectos de las cargas monofásicas

Conexión Yy en el banco de tres transformadores monofásicos

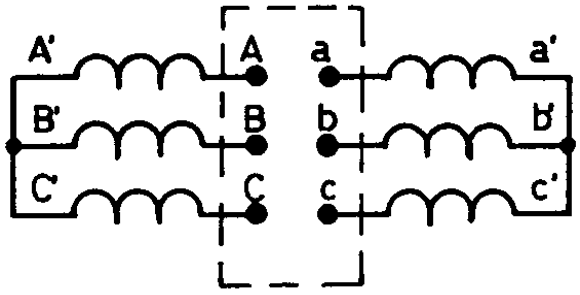
		I_{1R} (A)	I_{1S} (A)	I_{1T} (A)	V_{1RN} (V)	V_{1SN} (V)	V_{1TN} (V)	V_{1L} (V)	I_{2R} (A)	I_{2S} (A)	I_{2T} (A)	V_{2RN} (V)	V_{2SN} (V)	V_{2TN} (V)	V_{2RS} (V)	V_{2ST} (V)	V_{2TR} (V)
Sin carga	**Neutro aislado**																
	Neutro a la red																
Carga fase-neutro	**Neutro aislado**																
	Neutro a la red																
Carga fase-fase	**Neutro aislado**																
	Neutro a la red																

Observaciones:

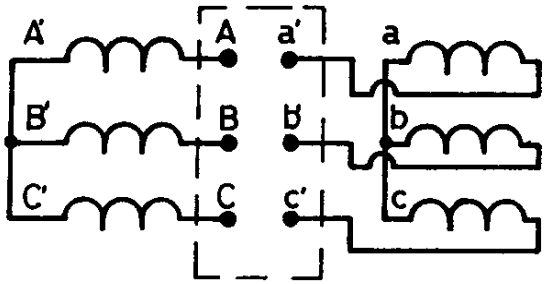


Circuito utilizado para analizar experimentalmente varias conexiones de los transformadores trifásicos

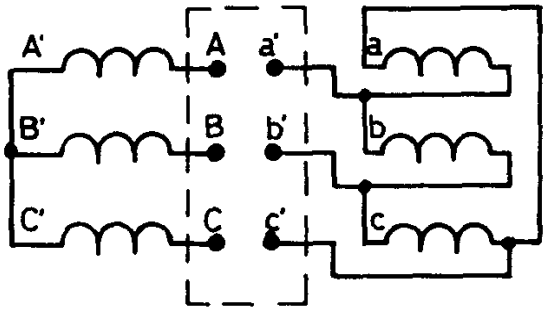
ALGUNAS CONEXIONES EN TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS



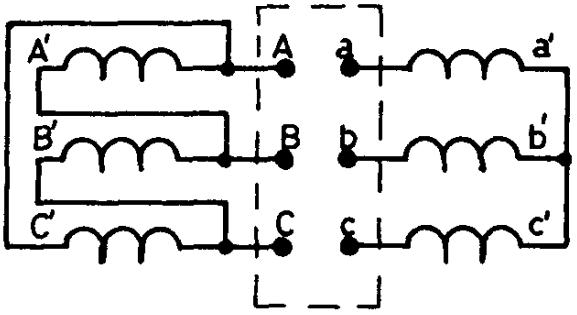
Conexión Yy0



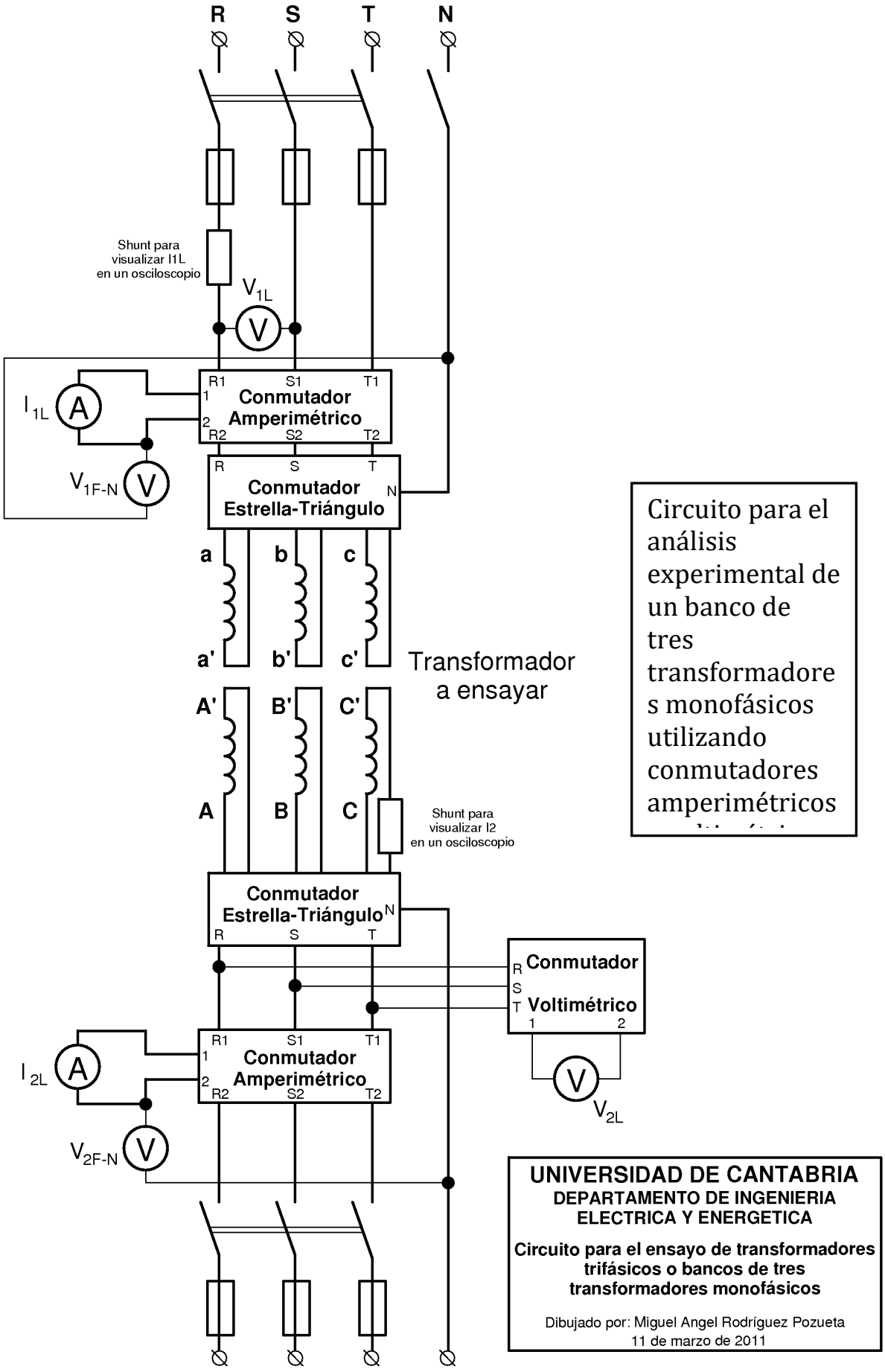
Conexión Yy6



Conexión Yd5



Conexión Dy11

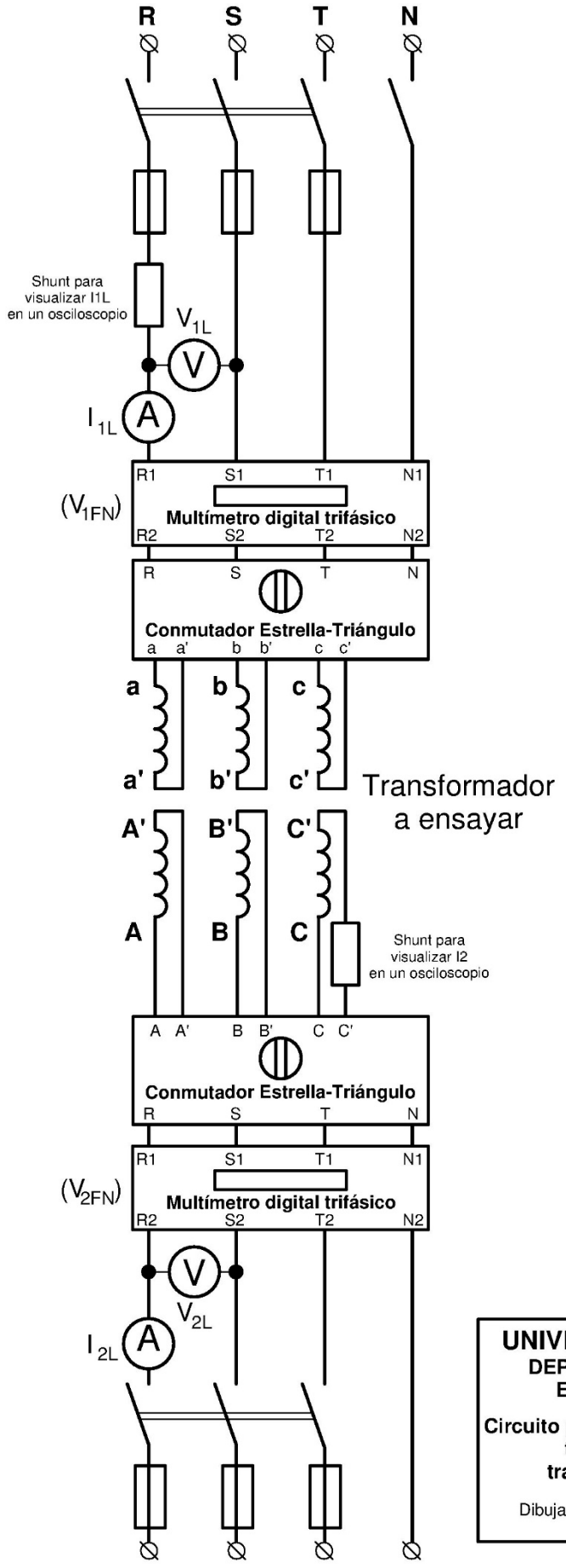


Circuito para el análisis experimental de un banco de tres transformadores monofásicos utilizando conmutadores amperimétricos

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA Y ENERGETICA

Circuito para el ensayo de transformadores trifásicos o bancos de tres transformadores monofásicos

Dibujado por: Miguel Angel Rodríguez Pozueta
11 de marzo de 2011



Circuito para el análisis experimental de un banco de tres transformadores monofásicos utilizando multímetros digitales trifásicos

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA Y ENERGETICA

Circuito para el ensayo de transformadores trifásicos o bancos de tres transformadores monofásicos

Dibujado por: Miguel Angel Rodríguez Pozueta
11 de octubre de 2017