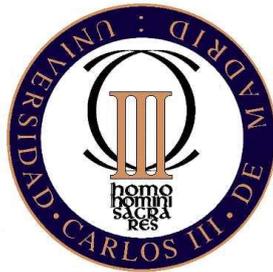


**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**Circuitos Magnéticos y Transformadores**  
**Prácticas de Laboratorio**

**PRÁCTICA 2**  
**GRUPO DE CONEXIÓN DE TRANSFORMADORES**  
**TRIFÁSICOS**

ANGEL RAMOS GÓMEZ

Versión 2  
Diciembre de 2010

## Indice

1. OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA
2. INTRODUCCIÓN TEÓRICA
  - 2.1. Grupo de conexión de un transformador trifásico
3. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA
  - 3.1. Identificación de los arrollamientos y de los terminales correspondientes
  - 3.2. Determinación del índice horario de un transformador trifásico
4. TIEMPOS PREVISTOS PARA LA PRÁCTICA
5. EVALUACIÓN DE LA PRÁCTICA

HOJAS DE RESULTADOS

## 1. OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA

Los principales objetivos de la Práctica 2 son:

- ✓ Familiarizarse con el transformador trifásico, su disposición de arrollamientos y sus bornas de conexión.
- ✓ Identificar los terminales correspondientes y homólogos de un transformador trifásico.
- ✓ Realizar conexiones estrella y triángulo con los arrollamientos.
- ✓ Medir el índice horario correspondiente a una configuración determinada.

## 2. INTRODUCCIÓN TEÓRICA

### 2.1. Grupo de conexión de un transformador trifásico

Como se ha explicado en las clases de teoría de la asignatura, las formas más habituales de realizar las conexiones entre los arrollamientos de un transformador trifásico son:

- ✓ Conexión estrella: cuando se unen en un mismo punto los tres terminales de los arrollamientos que poseen la misma polaridad A-B-C o A'-B'-C' (a-b-c o a'-b'-c' en el lado secundario).
- ✓ Conexión triángulo: cuando se unen sucesivamente los terminales de polaridad opuesta de cada dos arrollamientos hasta cerrar el circuito.
- ✓ Conexión zig-zag: cuando se subdivide en dos partes iguales los arrollamientos, una parte se conecta en estrella y luego, en cada rama, se une en serie con las bobinas invertidas de las fases adyacentes, siguiendo un orden cíclico.

Según el tipo de conexión y el lado de mayor o menor tensión, las diferentes conexiones se designan como:

Conexión	Lado primario	Lado secundario
Estrella	Y	y
Triángulo	D	d
Zig-zag	Z	z

Dependiendo de los tipos de conexión primario y secundario, pueden aparecer entre las tensiones de línea primaria y secundaria unas determinadas diferencias de fase.

La forma habitual de denominar estos desfases no es en grados, sino en múltiplos de 30°, lo que permite identificarlos con los que forman entre sí las agujas de un reloj cuando marca una hora exacta, dando lugar al llamado **índice horario**.

La determinación del índice horario se realiza mediante la siguiente metodología:

- 1) Se representa el fasor de la tensión fase-neutro primaria de una fase (arrollamiento AA' por ejemplo) de tal forma que se hace coincidir el terminal A con la parte superior del diagrama (coincidiendo con las 12 de un reloj imaginario superpuesto al diagrama fasorial).
- 2) Se representa el fasor de la tensión fase-neutro secundaria, a partir de la referencia definida por la tensión fase-neutro primaria.
- 3) Se superponen ambos diagramas, viendo el desfase que forman dos vectores, uno que pasa por A y el centro del diagrama y otro que pasa por a y ese mismo centro. De este desfase se deduce el índice horario.

A la denominación conjunta del tipo de conexión primaria, del tipo de conexión secundaria y del índice horario se le llama **grupo de conexión** (por ejemplo, Yd11, Dy5, Yy0, etc.).

### 3. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

En la práctica se van a realizar dos bloques de medidas.

En el primer bloque se realizará una identificación de los arrollamientos y de los terminales correspondientes.

Por su parte, en el segundo bloque se determinará el índice horario para una serie de conexiones de los arrollamientos.

En todos los casos se trabajará con el transformador de núcleo trifásico de la figura 3, que dispone de tres arrollamientos por columna, en el que las bornas de principio y final de bobina están accesibles desde el exterior sin que se haya realizado ningún conexionado entre las tres fases (estrella, triángulo o zig-zag). Para mayor simplicidad, en la práctica 2 se utilizarán únicamente dos arrollamientos por fase.

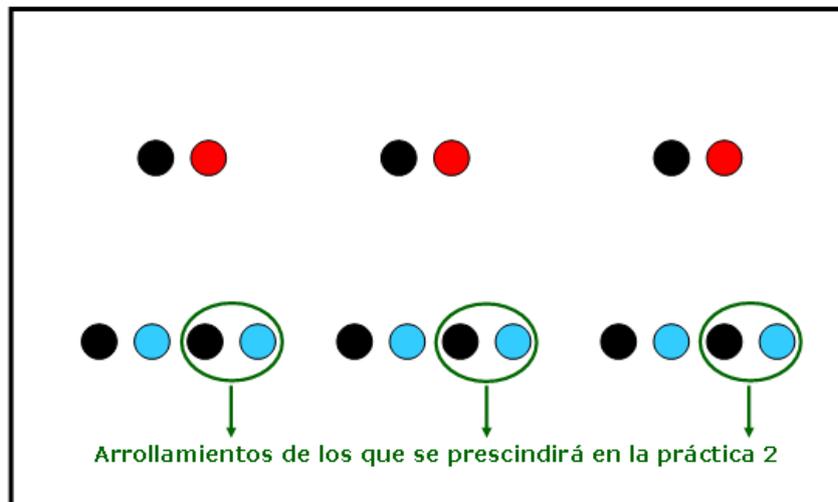


Figura 3: Bornas de conexión del transformador trifásico de la práctica 2

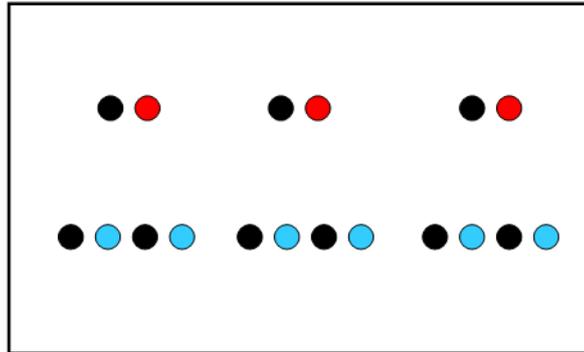
#### 3.1. Identificación de los arrollamientos y de los terminales correspondientes

##### 3.1.1. Determinación de los arrollamientos primarios y secundarios, de los arrollamientos de una misma columna y de la relación de transformación

Suponiendo que el transformador trifásico careciera de marcado de las bornas, el primero de los aspectos que se debiera comprobar es entre qué terminales hay arrollamiento, así como posibles conexiones internas entre los arrollamientos.

Para ello, se debe realizar entre pares de terminales una prueba de continuidad o una medida de resistencia, en cuyo caso únicamente nos interesaría si la resistencia tiene un valor finito (existe arrollamiento) o infinito (no existe arrollamiento).

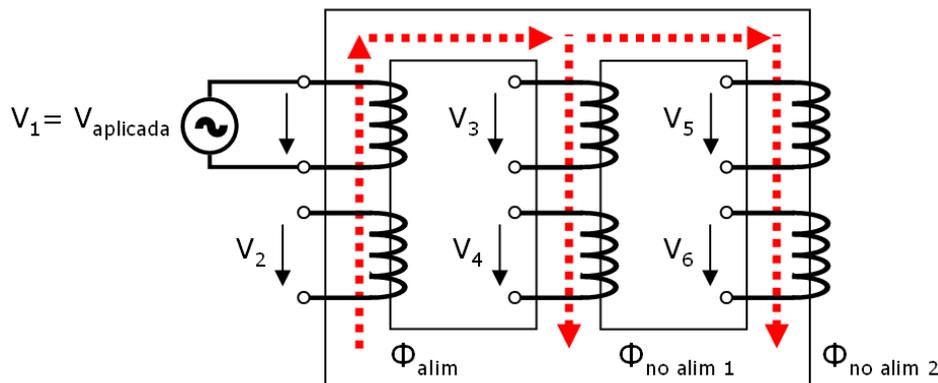
Realizar sólo, a modo de prueba ya que resulta evidente del marcado y la propia disposición física de los terminales, dos o tres medidas en las que se identifiquen los terminales de cada arrollamiento, y dibujar sobre el esquema de la figura 4 dichos arrollamientos.


**Figura 4: Identificación de los arrollamientos**

Una vez identificados los arrollamientos, se debe determinar cuales son los arrollamientos del lado de mayor tensión (lado primario o lado de alta tensión) y cuales son los arrollamientos del lado de menor tensión (lado secundario o lado de baja tensión), así como la relación de transformación existente entre ambos. Se identificará también qué arrollamientos están alojados en la misma columna del circuito magnético.

Para conseguir estos objetivos se alimentará uno de los arrollamientos aplicando una tensión alterna monofásica entre sus terminales, midiendo la tensión en vacío entre el resto de los terminales.

Para la realización de las comprobaciones indicadas, se ejecutará el montaje de la figura 5, alimentando con una tensión alterna monofásica a un arrollamiento. **Al desconocer a priori qué arrollamiento es el de mayor tensión, se aplicará por seguridad una tensión  $V_{aplicada}$  igual o inferior a la menor de las tensiones asignadas de los arrollamientos, 127 V.** Por ejemplo,  $V_{aplicada} = 100$  V es un valor adecuado para la ejecución de las medidas.


**Figura 5: Identificación de arrollamientos primario y secundario, así como de las parejas de arrollamientos alojados en idéntica columna**

El flujo magnético creado por el arrollamiento alimentado ( $\phi_{alim}$ ) retornará por las otras dos columnas ( $\phi_{no\ alim\ 1}$ ,  $\phi_{no\ alim\ 2}$ ), verificándose que  $\phi_{alim} = \phi_{no\ alim\ 1} + \phi_{no\ alim\ 2}$ .

En el caso de alimentar un arrollamiento de la columna central, el flujo que retorna por cada una de las columnas laterales será la mitad del de la central. Sin embargo, en el caso de alimentar una de las fases laterales, el flujo no se dividirá por las otras dos columnas en partes iguales sino de forma inversamente proporcional a las respectivas reluctancias.

A partir de la expresión  $\phi_{alim} = \phi_{no\ alim\ 1} + \phi_{no\ alim\ 2}$  y teniendo en cuenta la relación entre tensiones y flujos magnéticos definida por la ley de Faraday, se obtendrán las expresiones que relacionan las tensiones entre arrollamientos análogos de distintas columnas (1-2). La expresión (1) se refiere a los arrollamientos primarios de las tres fases o columnas y la expresión (2) se refiere a los arrollamientos secundarios de las tres fases o columnas, suponiendo en ambos casos que, como es lógico, el número de espiras de los arrollamientos primarios es el mismo en todas las fases ( $N_1$ ) y el número de espiras de los arrollamientos secundarios es el mismo en todas las fases ( $N_2$ ).

$$V_{aplicada} = V_1 = V_3 + V_5 \tag{1}$$

$$V_2 = V_4 + V_6 \tag{2}$$

Por su parte, el flujo magnético de cada una de las columnas (ya sea  $\phi_{alim}$ ,  $\phi_{no\ alim\ 1}$  o  $\phi_{no\ alim\ 2}$ ), será el mismo para el arrollamiento primario y el arrollamiento secundario de dicha columna, por lo que se tendrán las siguientes expresiones que relacionan las tensiones entre arrollamientos primarios y secundarios de la misma columna (3-4-5), siendo  $r_t$  la relación de transformación:

$$V_{aplicada} = V_1 = r_t \cdot V_2 \tag{3}$$

$$V_3 = r_t \cdot V_4 \tag{4}$$

$$V_5 = r_t \cdot V_6 \tag{5}$$

A partir del montaje de la figura 5, indicar en la tabla 1a los valores de tensiones medidas en cada uno de los arrollamientos cuando se alimenta un arrollamiento de una fase lateral, verificando que se cumplen las expresiones (1) y (2). Análogamente, indicar en la tabla 1b los valores de tensiones medidas en cada uno de los arrollamientos cuando se alimenta un arrollamiento de la fase central, verificando que también se cumplen las expresiones (1) y (2).

Comprobar en ambos casos el valor de la relación de transformación, verificando que dicho valor es aproximadamente el mismo cuando es calculado a partir de cualquiera de las expresiones (3), (4) o (5).

$V_1$ (V)	$V_2$ (V)	$V_3$ (V)	$V_4$ (V)	$V_5$ (V)	$V_6$ (V)

$V_3 + V_5$ (V)	$V_4 + V_6$ (V)

$r_{t1} = V_1 / V_2$	$r_{t2} = V_3 / V_4$	$r_{t3} = V_5 / V_6$	$r_t$ media

**Tablas 1a: Medidas obtenidas cuando se alimenta una fase lateral ( $V_1$ )**

<b>V<sub>1</sub> (V)</b>	<b>V<sub>2</sub> (V)</b>	<b>V<sub>3</sub> (V)</b>	<b>V<sub>4</sub> (V)</b>	<b>V<sub>5</sub> (V)</b>	<b>V<sub>6</sub> (V)</b>

<b>V<sub>1</sub> + V<sub>5</sub> (V)</b>	<b>V<sub>2</sub> + V<sub>6</sub> (V)</b>

<b>r<sub>t1</sub> = V<sub>1</sub> / V<sub>2</sub></b>	<b>r<sub>t2</sub> = V<sub>3</sub> / V<sub>4</sub></b>	<b>r<sub>t3</sub> = V<sub>5</sub> / V<sub>6</sub></b>	<b>r<sub>t media</sub></b>

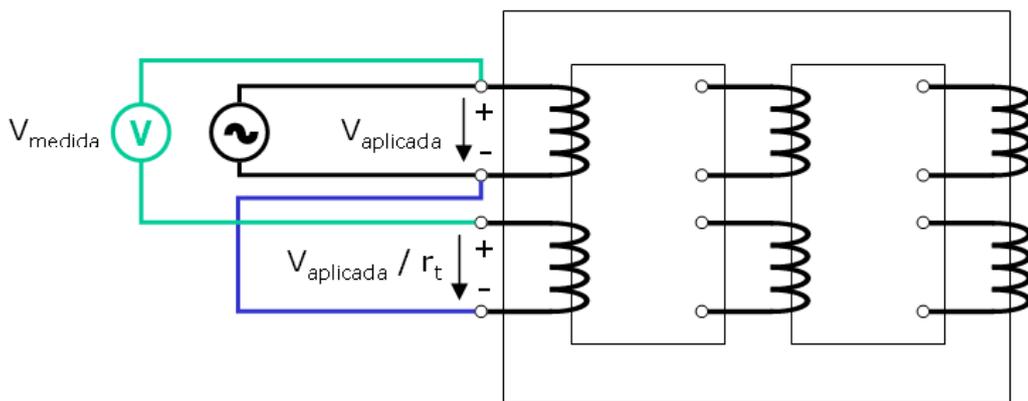
**Tabla 1b: Medidas obtenidas cuando se alimenta la fase central (V<sub>3</sub>)**

### 3.1.2. Determinación de los terminales correspondientes

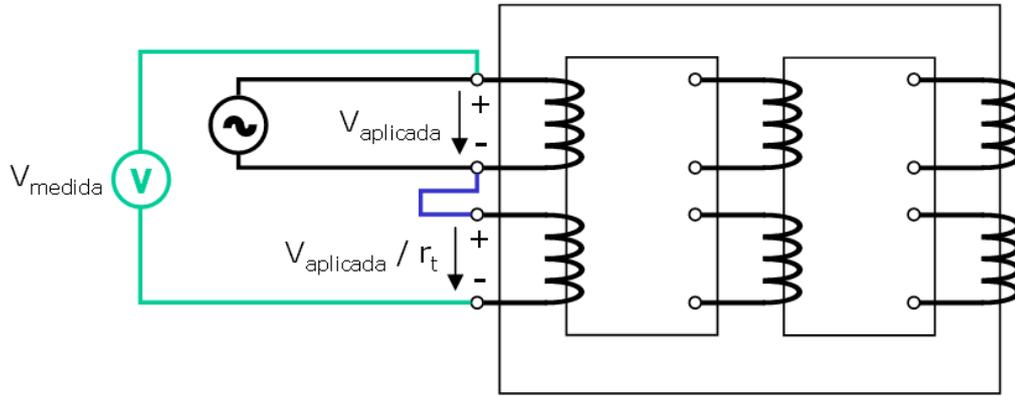
Como se ha explicado en las clases de teoría de la asignatura, dos terminales de sendas bobinas acopladas magnéticamente son correspondientes cuando al ser recorridos por un mismo flujo magnético, el sentido de la fuerza electromotriz es el mismo. Por tanto, en un mismo instante de tiempo, dichos terminales tienen la misma polaridad respecto de sus terminales opuestos.

#### Terminales correspondientes de arrollamientos de una misma columna

La metodología para determinar los terminales correspondientes de arrollamientos de una misma columna consiste en unir (al azar) un terminal de uno de los arrollamientos con un terminal del otro de los arrollamientos, midiendo la tensión entre los terminales opuestos a los unidos cuando se alimenta uno de los arrollamientos (ver figuras 6a-6b).



**a) Si se conectan terminales correspondientes**



b) Si no se conectan terminales correspondiente

**Figura 6: Conexión entre arrollamientos de la misma columna para determinar los terminales correspondientes**

De la figura 6a se deduce fácilmente que, si hemos unido terminales correspondientes, se verificará que:

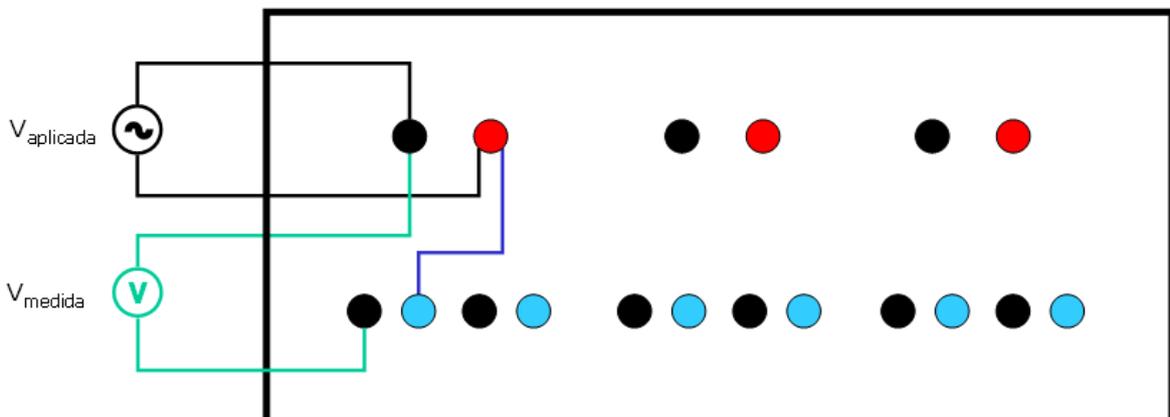
$$V_{medida} = V_{aplicada} - V_{aplicada} / r_t = V_{aplicada} ( 1 - 1 / r_t ) \quad (6)$$

$$V_{medida} / V_{aplicada} = ( 1 - 1 / r_t ) \quad (6')$$

En caso contrario, tal y como se desprende de la figura 6b, si hemos unido terminales no correspondientes, se verificará que:

$$V_{medida} = V_{aplicada} + V_{aplicada} / r_t = V_{aplicada} ( 1 + 1 / r_t ) \quad (7)$$

$$V_{medida} / V_{aplicada} = ( 1 + 1 / r_t ) \quad (7')$$



**Figura 7: Montaje para la determinación de los terminales correspondientes de arrollamientos de la misma columna**

Para determinar los terminales correspondientes primarios y secundarios de una misma columna del transformador trifásico de la práctica, se realizará el montaje de la figura 7, en el que se unirá el terminal rojo (marcado como "0") del arrollamiento superior con el terminal azul (marcado como "127 V") del arrollamiento inferior izquierdo. A continuación, aplica una tensión al arrollamiento superior (de 100 V por ejemplo) y mide la tensión entre los terminales no unidos (terminal negro del arrollamiento superior, marcado como "220 V" y terminal negro del arrollamiento inferior, marcado como "0"), anotando los resultados en la tabla 2.

$V_{aplicada}$ (V)	$V_{medida}$ (V)	$V_{medida} / V_{aplicada}$

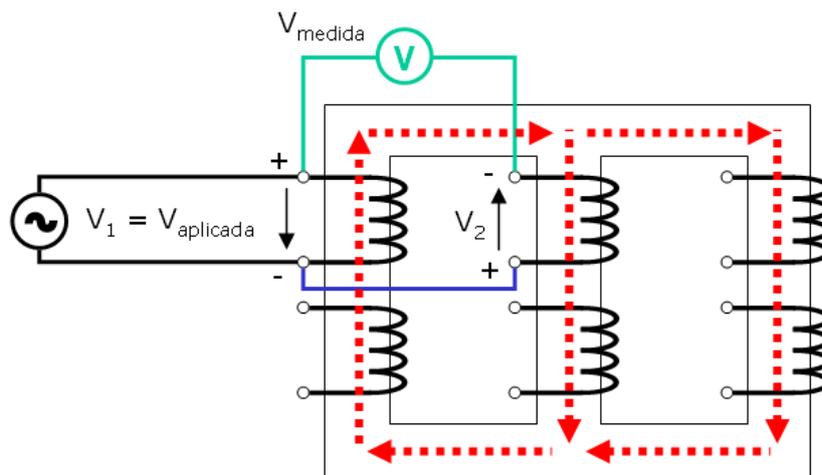
**Tabla 2: Medidas obtenidas a partir del montaje de la figura 7 (a priori no se conoce si es el circuito de la figura 6a o 6b)**

A priori no es conocido si el montaje de la figura 7 se corresponde con el circuito de la figura 6a o con el circuito de la figura 6b, pero a partir de las medidas de la tabla 2, ya si que es posible determinar cuales son los terminales correspondientes del arrollamiento superior y el arrollamiento inferior, sin más que comparar dichas medidas con las expresiones (6) y (7). La forma más sencilla de hacerlo es calcular la relaciones  $1 - 1/r_t$  y  $1 + 1/r_t$ , obtenidas a partir del valor  $r_t$  del apartado anterior, y compararlas con el cociente  $V_{medida} / V_{aplicada}$  de la tabla 2.

$1 - 1/r_t$	$1 + 1/r_t$

#### Terminales correspondientes de arrollamientos de distintas columnas

En el caso de terminales homólogos de arrollamientos de distintas columnas, la metodología es la misma, consistente en unir un terminal de uno de los arrollamientos con un terminal del otro de los arrollamientos, midiendo la tensión entre los terminales opuestos a los unidos cuando se alimenta uno de los arrollamientos (ver figura 8).



**Figura 8: Determinación de terminales correspondientes entre arrollamientos de diferentes columnas**

Si los flujos por las tres columnas tuvieran idéntico sentido, los terminales homólogos de los tres arrollamientos tendrían idéntica polaridad respecto de los terminales opuestos.

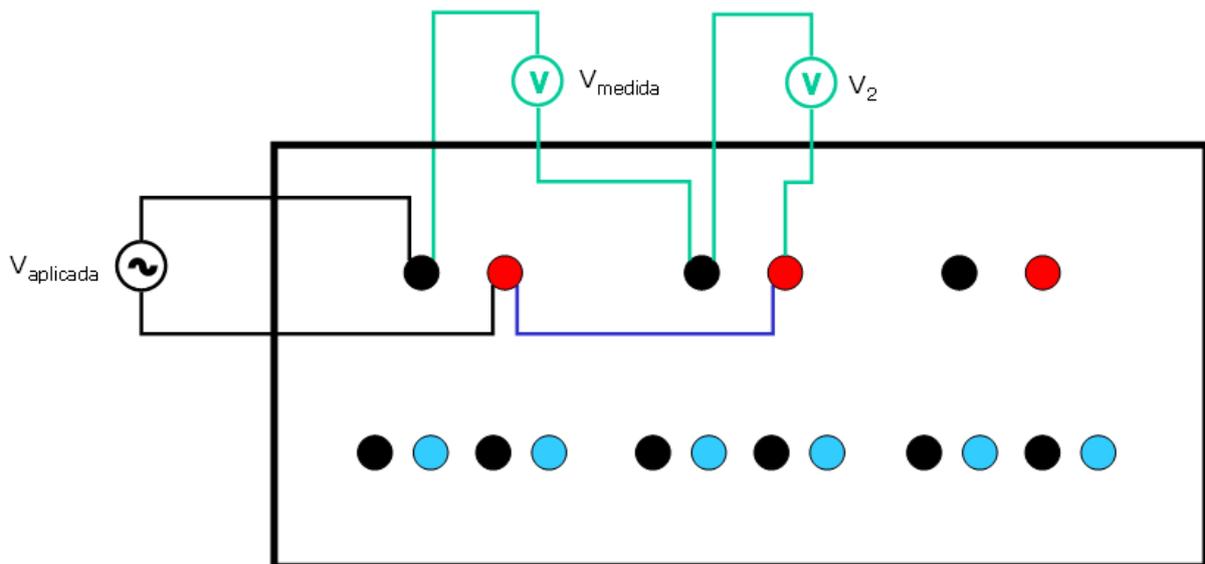
Sin embargo, en el ensayo realizado alimentando un arrollamiento con tensión alterna monofásica, el flujo creado por la columna que se alimenta será ascendente en su columna y descendente en las otras dos, como se deduce de la figura 8, por lo que, en este caso, la polaridad de los terminales homólogos respecto de sus terminales opuestos tiene diferente signo, verificándose que:

$$V_{medida} = V_1 + V_2 = V_{aplicada} + V_2 \quad (8)$$

Se deduce fácilmente que, en caso de haber unido terminales no homólogos se tendría:

$$V_{medida} = V_1 - V_2 = V_{aplicada} - V_2 \quad (9)$$

En este caso, para determinar los terminales correspondientes se realizará el montaje de la figura 9, en el que se unirán los terminales rojos (marcados como "0") de dos fases del arrollamiento superior izquierdo (de 100 V por ejemplo) y mide la tensión entre los terminales no unidos (terminales negros, marcados como "220 V") y la tensión entre los terminales del otro arrollamiento superior, anotando los resultados en la tabla 3.



**Figura 9: Montaje para la determinación de los terminales correspondientes de arrollamientos de la misma columna**

$V_{aplicada}$ (V)	$V_{medida}$ (V)	$V_2$ (V)

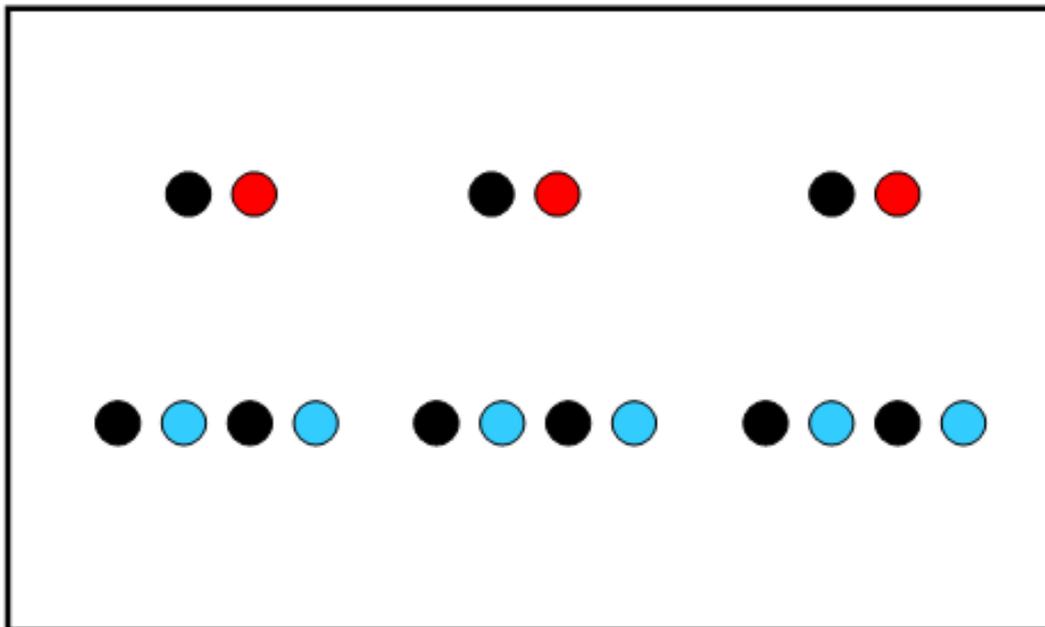
**Tabla 3: Medidas obtenidas a partir del circuito de la figura 7 uniendo ambos terminales rojos de dos fases del arrollamiento superior**

A partir de las medidas de la tabla 3, ya es posible determinar cuales son los terminales correspondientes de las distintas fases del arrollamiento superior, comparando dichas medidas con las ecuaciones (8) y (9).

### Marcado de los terminales del transformador

A partir de los montajes de las figuras 7 y 9, así como las medidas obtenidas de las tablas 2 y 3, se puede realizar una identificación completa de los terminales correspondientes del transformador trifásico. Ello unido con el montaje de la figura 5 y las medidas de la tabla 1, nos permite una caracterización y marcado completo del transformador.

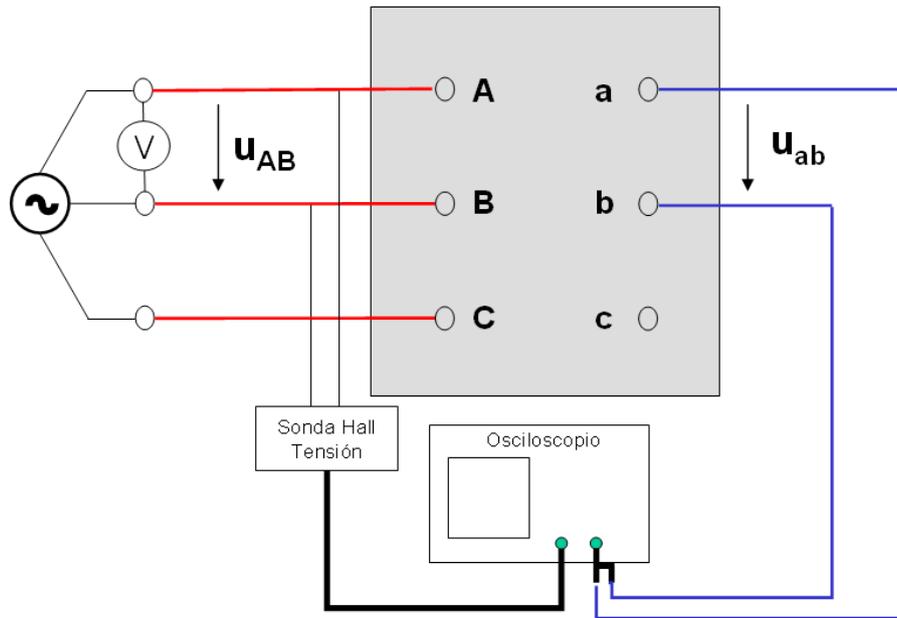
Para ello, se identificarán en los terminales de la figura 10, los terminales de los arrollamientos primarios A-A', B-B' y C-C', y los terminales de los arrollamientos secundarios a-a', b-b' y c-c'.



**Figura 10: Identificación de los terminales correspondientes del transformador trifásico**

### 3.2. Determinación del índice horario de un transformador trifásico

Para la obtención del desfase horario de un transformador trifásico, se utilizará el osciloscopio llevando las tensiones de línea primaria y secundaria, al alimentar el transformador con la fuente de alimentación trifásica con una tensión de línea de 50 V, según se indica en la figura 11.



**Figura 11: Esquema de medida para determinar el desfase horario de un transformador**

La tensión de línea primaria se llevará al osciloscopio por medio de una sonda Hall de tensión, mientras que la tensión de línea secundaria la llevaremos directamente al osciloscopio por medio de un conector banana-BNC.

Es muy importante que ambas tensiones sean llevadas al osciloscopio con idéntica polaridad. Para ello se deberá conectar el terminal "A" del arrollamiento primario al terminal rojo (marcado como P2) de la sonda Hall de tensión y el terminal "B" del arrollamiento primario al terminal negro (marcado como P1) de la sonda Hall de tensión. Por su parte, se conectará el terminal "a" del arrollamiento secundario al terminal positivo o central del conector banana-BNC y el terminal "b" al terminal negativo o periférico.

De esta forma, se trata de visualizar en el osciloscopio el desfase existente entre ambas sinusoides, midiéndolo desde la tensión primaria (que se toma como referencia) hasta la tensión secundaria. El desfase se expresará en  $^{\circ}$  y en horas de reloj (desde 0 hasta 11), siendo  $30^{\circ}$  la diferencia entre un índice y el siguiente.

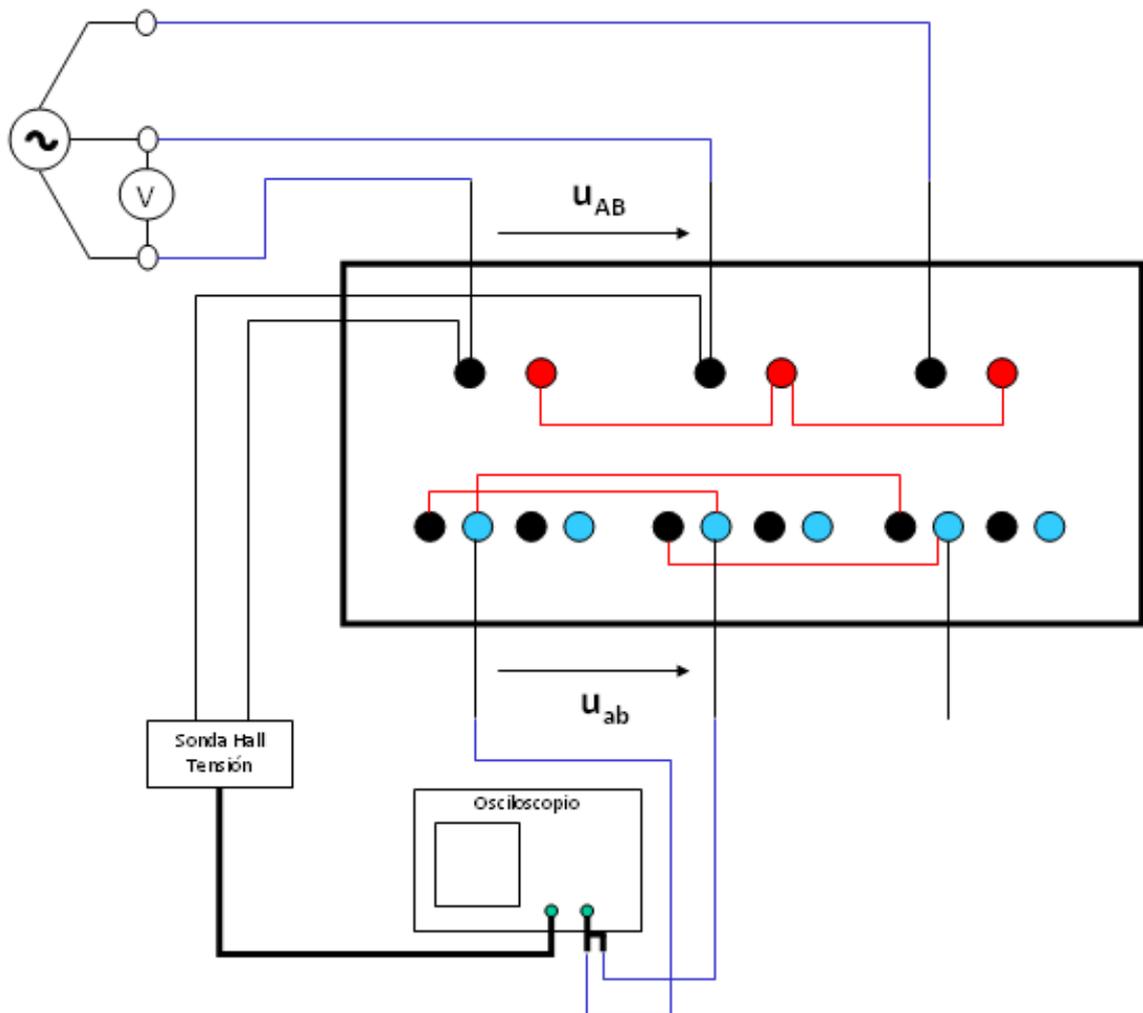
Durante la realización de la práctica, el profesor entregará a cada puesto las conexiones a realizar en el transformador trifásico, es decir, la forma en la que en el arrollamiento primario se conectarán entre sí las bobinas A-A', B-B' y C-C', y la forma en la que en el arrollamiento secundario se conectarán entre sí las bobinas a-a', b-b' y c-c'. En la figura 12 se plantea un ejemplo de las conexiones a realizar.

Una vez realizados los montajes y efectuadas las medidas en el osciloscopio, se completará la tabla 4.

	Desfase (div)	Desfase (ms)	Desfase (°)	Índice horario	Grupo de conexión
CONEXIÓN 1					
CONEXIÓN 2					
CONEXIÓN 3					

**Tabla 4: Determinación de desfases, índice horario y grupo de conexión**

*Nota: En la determinación de los desfases, se debe tener en cuenta que un ciclo completo de la sinusoide son 20 ms, que equivalen a 360°. Se recomienda utilizar en el osciloscopio la escala de 5 ms/div.*



**Figura 12: Ejemplo de conexionado sobre el que realizar la determinación del desfase horario**

#### 4. TIEMPOS PREVISTOS PARA LA PRÁCTICA

A continuación se indican las duraciones previstas para cada una de las partes de la práctica:

Concepto	Duración prevista
Explicaciones iniciales del profesor	10 minutos
Identificación arrollamientos	5 minutos
Montaje circuito figura 5, medidas tabla 1 y análisis resultados	20 minutos
Montaje circuitos figura 7, medidas tabla 2 y análisis resultados	15 minutos
Montaje circuito figura 9, medidas tabla 3 y análisis resultados	15 minutos
Marcado del transformador	5 minutos
Determinación grupo de conexión de 3 montajes	20 minutos

#### 5. EVALUACIÓN DE LA PRÁCTICA

La evaluación de la práctica será realizada de acuerdo a los criterios indicados en el apartado 4.1 del documento "Aspectos generales de las prácticas de Circuitos Magnéticos y Transformadores", otorgando el siguiente peso a cada una de las partes:

Concepto	Peso en la evaluación
Examen laboratorio	30 %
Informe de la práctica	40 %
Examen teórico	30 %

En el informe de la práctica (que deberá ser entregado (hojas de resultados) en el mismo día, al finalizar la práctica) el alumno, a partir de las medidas tomadas en el laboratorio, completará los cálculos y análisis indicados en el guión de la práctica.

Adicionalmente, en aquellos casos en los que el alumno lo considere oportuno (ya sea porque le haya llamado la atención, porque las medidas parezcan erróneas, etc.), se podrán incluir en el informe de la práctica observaciones sobre las medidas o los cálculos efectuados.



## HOJA DE RESULTADOS - PRÁCTICA 2

**FECHA:**

**PUESTO:**

**APELLIDOS Y NOMBRE:**


**Determinación de los arrollamientos primarios y secundarios, de los arrollamientos de una misma columna y de la relación de transformación**

$V_1$ (V)	$V_2$ (V)	$V_3$ (V)	$V_4$ (V)	$V_5$ (V)	$V_6$ (V)

$V_3 + V_5$ (V)	$V_4 + V_6$ (V)

$r_{t1} = V_1 / V_2$	$r_{t2} = V_3 / V_4$	$r_{t3} = V_5 / V_6$	$r_t$ media

**Tablas 1a: Medidas obtenidas cuando se alimenta una fase lateral ( $V_1$ )**

$V_1$ (V)	$V_2$ (V)	$V_3$ (V)	$V_4$ (V)	$V_5$ (V)	$V_6$ (V)

$V_1 + V_5$ (V)	$V_2 + V_6$ (V)

$r_{t1} = V_1 / V_2$	$r_{t2} = V_3 / V_4$	$r_{t3} = V_5 / V_6$	$r_t$ media

**Tabla 1b: Medidas obtenidas cuando se alimenta la fase central ( $V_3$ )**

Indica la principal diferencia que observas entre las medidas de la tabla 1a y las medidas de la tabla 1b. Justifica tu respuesta.

### Determinación de los terminales correspondientes de los arrollamientos de una misma columna

Terminales unidos	Vaplicada (V)	Vmedida (V)	Vmedida / Vaplicada
Rojo superior – Azul inferior			

**Tabla 2: Medidas obtenidas a partir del montaje de la figura 7**

$1 - 1/r_t$	$1 + 1/r_t$

Indica si los terminales unidos son o no terminales correspondientes. Justifica tu respuesta.

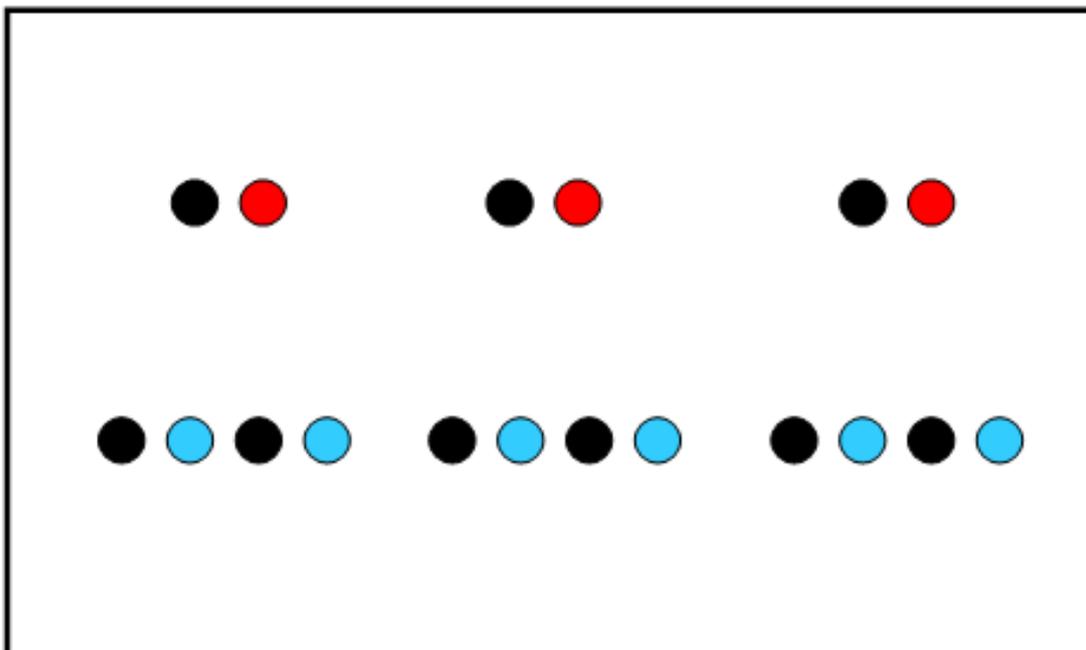
**Determinación de los terminales correspondientes de los arrollamientos de distintas columnas**

Terminales unidos	$V_{aplicada}$ (V)	$V_{medida}$ (V)	$V_2$ (V)
Rojo lateral – Rojo central			

**Tabla 3: Medidas obtenidas a partir del circuito de la figura 7 uniendo ambos terminales rojos de dos fases del arrollamiento superior**

Indica si los terminales unidos son o no terminales correspondientes. Justifica tu respuesta.

**Marcado de los terminales del transformador (A-A', B-B', C-C' y a-a', b-b', c-c')**



**Figura 8: Identificación de los terminales correspondientes del transformador trifásico**

**Determinación del índice horario y grupo de conexión**

	Desfase (div)	Desfase (ms)	Desfase ( $^{\circ}$ )	Índice horario	Grupo de conexión
<b>CONEXIÓN 1</b>					
<b>CONEXIÓN 2</b>					
<b>CONEXIÓN 3</b>					

**Tabla 4: Determinación de desfases, índice horario y grupo de conexión**

*Nota:* En la determinación de los desfases, se debe tener en cuenta que un ciclo completo de la sinusoide son 20 ms, que equivalen a  $360^{\circ}$ . Se recomienda utilizar en el osciloscopio la escala de 5 ms/div.