	<b>MASTER DE FORMACIÓN</b> <b>B1.1 y B1.3</b> <b>MÓDULO 3</b> <b>FUNDAMENTOS DE ELECTRICIDAD</b>	Edición: 3 Revisión: 9 Fecha: 31/07/2017
---	---	--

## ÍNDICE M3

### Capítulo 15. Transformadores. Relés

<b>15.1. PRINCIPIOS Y FUNCIONAMIENTO DE TRANSFORMADORES.....</b>	<b>3.15.2</b>
<b>15.2. FABRICACION DE LOS TRANSFORMADORES.....</b>	<b>3.15.2</b>
<b>15.3. TEORIA DE FUNCIONAMIENTO Y COMPORTAMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES BAJO CONDICIONES DE CARGA Y SIN CARGA. CORRIENTES PRIMARIA Y SECUNDARIA, VOLTAJE, RELACION DE VUELTAS.</b>	<b>3.15.4</b>
<b>15.4. PERDIDAS EN LOS TRANSFORMADORES Y FORMA DE CONTRARRESTARLAS.....</b>	<b>3.15.6</b>
<b>15.5. TRANSFERENCIA DE POTENCIA, RENDIMIENTO, MARCAS DE POLARIDAD.....</b>	<b>3.15.7</b>
<b>15.6. TIPOS DE TRANSFORMADORES.....</b>	<b>3.15.8</b>
<b>15.6.1. Transformadores de tensión.....</b>	<b>3.15.8</b>
<b>15.6.2. Transformadores de corriente.....</b>	<b>3.15.8</b>
<b>15.6.3. Autotransformador.....</b>	<b>3.15.10</b>
<b>15.6.4 Transformador acoplador de impedancias.....</b>	<b>3.15.11</b>
<b>15.7. RELES.....</b>	<b>3.15.12</b>
<b>15.8. CONTACTORES.....</b>	<b>3.15.14</b>

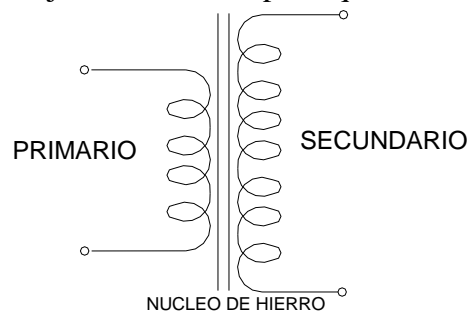
## CAPÍTULO 15

### **TRANSFORMADORES. RELÉS.**

#### **15.1. PRINCIPIOS Y FUNCIONAMIENTO DE TRANSFORMADORES.**

Un transformador es un dispositivo que convierte la corriente alterna de una frecuencia dada en otra de la misma frecuencia pero con distinta tensión e intensidad, de modo que un incremento de la tensión se traduce en un decremento de la intensidad, ya que el transformador no altera la potencia recibida, supuesto el transformador sin pérdidas. Se usa, por tanto, fundamentalmente, para aumentar o disminuir el voltaje o la intensidad en un circuito de corriente alterna.

Un transformador consta esencialmente de dos arrollamientos de hilo conductor aislados eléctricamente entre sí. Su diagrama esquemático es el mostrado en la figura 3.15.1, en la que se ve que el primario se suele dibujar con menos espiras que el secundario.



*Fig. 3.15.1. Transformador. Representación esquemática*

De los dos arrollamientos, uno recibe el nombre de primario y actúa como receptor de la energía eléctrica y el otro se llama secundario y es el que habitualmente cede esa energía, aunque un transformador es perfectamente reversible, de modo que el receptor podría ser el secundario y el primario ser el que ceda la energía. Por tanto, un transformador precisa de un flujo variable para su funcionamiento, por lo que no puede ser utilizado con una fuente de corriente continua.

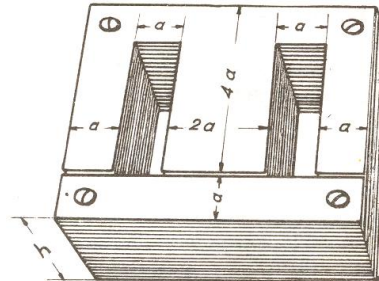
#### **15.2. FABRICACION DE LOS TRANSFORMADORES.**

Un transformador consta esencialmente de un circuito magnético constituido por el núcleo y de un circuito eléctrico constituido por los devanados o arrollamientos.

Un transformador elemental se muestra en a) de la figura 3.15.2, con el primario bobinado en una rama del núcleo y el secundario en la rama contraria. Cuando se aplica una ddp al primario se crea un flujo magnético alterno (el flujo circulará en el sentido marcado en una alternancia del voltaje aplicado y en sentido contrario en la otra alternancia) que circula por el núcleo como flujo mutuo o flujo que atraviesa a la vez a primario y secundario, o se pierde en el

entorno del primario y secundario conocido como flujo disperso ligado al primario o al secundario respectivamente.

Figura



a) Transformador elemental

b) Núcleo de un transformador típico

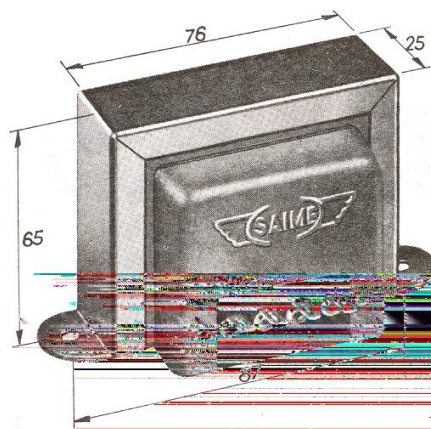
*Fig. 3.15.2. Construcción de un transformador*

Con el fin de evitar la dispersión de flujo, que da lugar a pérdidas significativas, lo habitual es fabricar el núcleo del transformador como se muestra en b) de la figura 15.2. Este núcleo está formado por láminas de hierro de espesores comprendidos entre 0,25 y 0,75 mm. en E y en I ensambladas alternativamente en uno y otro sentido para que no haya discontinuidad en el mismo. La columna central del núcleo tiene doble espesor que las laterales porque en ella se concentra todo el flujo que luego se reparte por las dos columnas laterales.

Las dimensiones del núcleo son una función de la potencia a obtener del transformador, siendo aplicable la siguiente fórmula empírica para un clima como el europeo:

$$W = 4,8 a^3 h \quad (\text{vatios})$$

siendo “a” el semiancho de la columna en cm. y “h” el grosor del núcleo también en cm.



*Fig. 3.15.3. Transformador de audiofrecuencia*

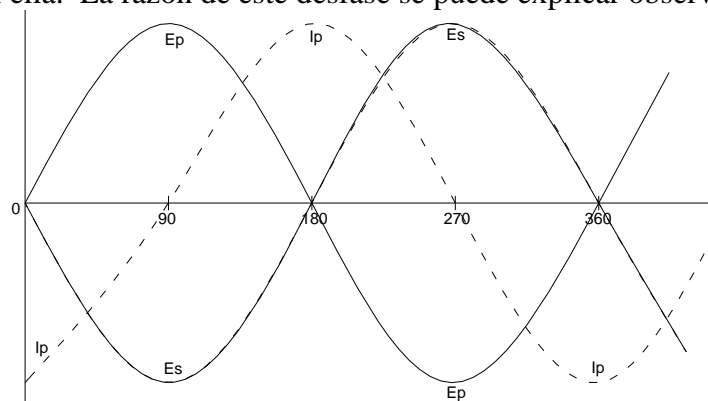
Sobre la parte central del núcleo se introducen los devanados previamente bobinados sobre un carrete de cartón baquelizado y en forma de varias capas superpuestas. Las bobinas son de hilo de cobre esmaltado de la sección adecuada a la corriente que tenga que circular por ellas.

En el módulo 6 se estudiará la relación entre sección e intensidad de corriente en un conductor. El conjunto se protege de la humedad y de las vibraciones sumergiéndolo por completo en un material protector semejante al alquitrán y se sujeta al núcleo con tornillos o con una cubierta metálica. La figura 3.15.3 muestra un transformador de audiofrecuencia, terminado y fijado con armadura metálica.

Los núcleos son de hierro laminado para las bajas frecuencias mientras que para las altas frecuencias se emplean núcleos de ferritas formadas a partir de óxidos compuestos de hierro-níquel o de hierro-manganeso y sus combinaciones. Tienen una resistividad tan elevada que son despreciables las pérdidas por corrientes parásitas hasta con frecuencias de Megahercios. Además su permeabilidad inicial es elevada pero su densidad de flujo de saturación es baja, lo que las hace inadecuadas para transformadores de alimentación.

### **15.3. TEORIA DE FUNCIONAMIENTO Y COMPORTAMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES BAJO CONDICIONES DE CARGA Y SIN CARGA. CORRIENTES PRIMARIA Y SECUNDARIA, VOLTAJE, RELACION DE VUELTAS.**

La teoría de funcionamiento de un transformador se basa en los fenómenos de inducción electromagnética. Cuando se aplica una f.e.m. de corriente alterna al primario de un transformador, se origina un campo magnético que se expande y se contrae con las alternancias de la ddp aplicada. Este campo magnético variable atraviesa las espiras del secundario induciendo en él una fem que varía a la misma velocidad que lo hace la ddp aplicada, pero desfasada  $180^\circ$  con ella. La razón de este desfase se puede explicar observando la figura 3.15.4.



*Fig. 3.15.4. Formas de onda de tensión e intensidad en un transformador*

La intensidad en el primario,  $I_p$ , se retrasa  $90^\circ$  con respecto al voltaje del primario,  $E_p$ , debido a la reactancia inductiva. Esta intensidad variable origina un campo magnético, también variable, que hace que se induzca una f.e.m. en el secundario y como, de acuerdo con la Ley de Lenz, la tensión inducida se opone a la causa que la produce, cuando la intensidad del primario, causante del flujo magnético, tiende a ir a cero con máxima variación la tensión en el secundario

tiende a máximo negativo como reforzando la intensidad e intentando impedir que caiga a cero. Cuando  $I_p$  pasa por  $90^\circ$ , con valor nulo y máxima variación, la tensión inducida es máxima y negativa, resultando las curvas con los desfases que se muestran en la figura anterior. Queda, pues, claro que  $E_s$  está desfasada  $180^\circ$  con  $E_p$ .

Una de las características más importantes de un transformador es que el devanado primario puede quedar conectado a una fuente y apenas consume energía si el devanado secundario no está conectado a una carga. En efecto, si se supone un transformador ideal, sin resistencia en sus arrollamientos, en el devanado primario se desarrolla una fuerza contraelectromotriz igual y de signo contrario a la fem aplicada que reduce a cero la intensidad de corriente. Cuando se conecta una carga al secundario del transformador, la fem inducida hace que circule una corriente por ese devanado que, a su vez, genera un campo magnético que se va a oponer, o que tiende a neutralizar, al campo magnético producido por la corriente del devanado primario. Este campo magnético tiende a reducir la fem del primario, haciendo que circule más intensidad por el primario, lo que refuerza el campo magnético y, consiguientemente, hace aumentar la fem inducida en el secundario y la intensidad en el secundario. Consecuentemente, la intensidad en el primario aumentará en la misma proporción que aumente la intensidad en el secundario.

En un transformador con núcleo de hierro el flujo que atraviesa los dos devanados es el mismo y la fem inducida es una función directa de la variación del flujo y del número de vueltas del devanado. O sea

$$E_p = - N_p \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \qquad E_s = - N_s \frac{\Delta \phi}{\Delta t}$$

El signo menos indica solamente que ambas fem's están en oposición.


Dividiendo la una por la otra se obtiene:

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

Y teniendo en cuenta que en un transformador no hay ni elevación ni reducción de potencia:

$$P_p = P_s \qquad E_p I_p = E_s I_s \qquad \frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s}$$

Al cociente  $N_p / N_s$  o relación entre el número de espiras del primario y del secundario se conoce con el nombre de **relación de transformación**. Cuando la tensión en el secundario es mayor que en el primario el transformador es llamado elevador (step – up transformer) y, en caso contrario, o cuando la tensión en el secundario es menor que en el primario, el transformador se llama reductor (step – down transformer).

	<b>MASTER DE FORMACIÓN</b> <b>B1.1 y B1.3</b> <b>MÓDULO 3</b> <b>FUNDAMENTOS DE ELECTRICIDAD</b>	Edición: 3 Revisión: 9 Fecha: 31/07/2017
---	---	--

La eficiencia de un transformador depende de las pérdidas en el cobre y de las pérdidas en el núcleo. Estas pérdidas son muy pequeñas (se logran transformadores con rendimientos superiores al 90%).

#### 15.4. PERDIDAS EN LOS TRANSFORMADORES Y FORMA DE CONTRARRESTARLAS

La potencia obtenida en un transformador es necesariamente inferior a la suministrada debido a pérdidas en forma de calor por calentamiento de los arrollamientos primario y secundario (recordar que las calorías desprendidas por un conductor vienen dadas por la expresión  $0,24 I^2 R t$ ), conocidas como pérdidas en el cobre, por calentamiento del núcleo a causa de la histéresis y de corrientes de Foucault conocidas como pérdidas en el núcleo y a consecuencia de la dispersión del flujo en el núcleo.

La dispersión del flujo se elimina considerablemente bobinando el primario con una mitad en una rama del núcleo y con la otra mitad en la otra rama y el secundario se bobina encima del primario y también en las dos mitades del núcleo disminuyéndose así el flujo disperso que queda reducido al pequeño espacio necesario para aislar eléctricamente a los devanados primario y secundario.

Recordar que la histéresis se produce como consecuencia, de un lado de la oposición del núcleo a ser magnetizado y de otro la tendencia del núcleo a mantener su estado imantación de cuando la corriente cambia de sentido. Se sabe que la pérdida por histéresis viene dada por la fórmula:

$$P = k B^n f V 10^{-7} \text{ vatios}$$

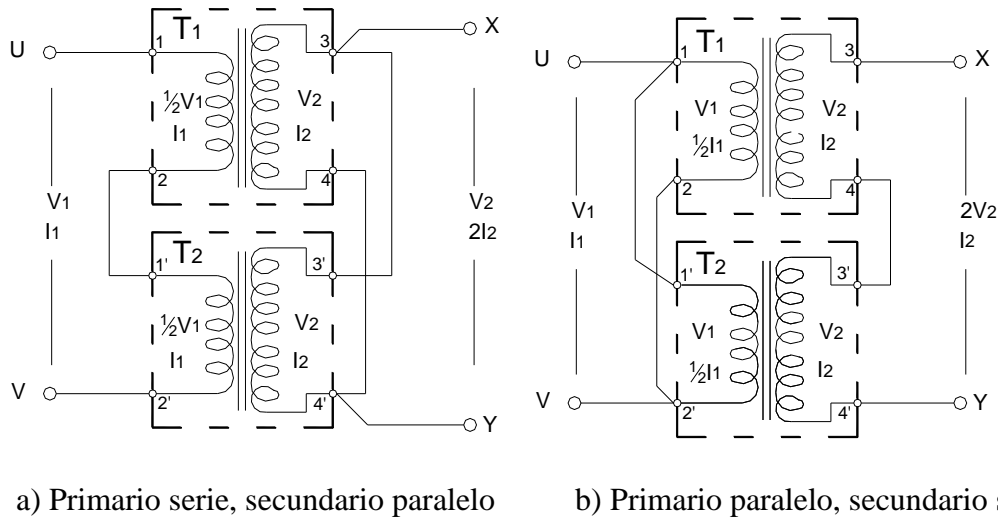
donde “k” y “n” son constantes que dependen del tipo y tratamiento aplicado al núcleo, B es el valor máximo de la densidad de flujo, “f” es la frecuencia en hertzios, o ciclos por segundo y V es el volumen del núcleo en centímetros cúbicos.

Las corrientes de Foucault se producen como consecuencia de las variaciones de la densidad de flujo en el interior del núcleo. La densidad de flujo, al variar, induce una fem en el mismo núcleo, además de hacerlo en los arrollamientos. Estas fem inducidas en el núcleo originan unas corrientes extrañas conocidas como corrientes de Foucault que causan el calentamiento del núcleo, lo que da origen a una pérdida de potencia. La pérdida por corrientes de Foucault viene dada por la fórmula:  $P = 1,6 \times 10^{-11} V (f L B)^2$  vatios donde V es el volumen del núcleo en centímetros cúbicos, “f” es la frecuencias en hertzios, L es el espesor de las láminas del núcleo y B es el valor máximo de la densidad de flujo.

La reducción de las corrientes de Foucault o Eddy currents se consigue con el uso de núcleos laminados con lo que se obtienen en los transformadores rendimientos realmente elevados, generalmente superior al 90% pudiendo incluso llegar al 99% en las grandes instalaciones industriales.

### 15.5. TRANSFERENCIA DE POTENCIA, RENDIMIENTO, MARCAS DE POLARIDAD.

Puede ser necesario usar más de un transformador en un circuito teniendo los transformadores conectados en serie o en paralelo. La figura 3.15.5 muestra estos dos tipos de conexionado, aplicable a transformadores exactamente iguales (mismo número de vueltas en primario y secundario, misma sección de hilo, mismo núcleo etc.)



a) Primario serie, secundario paralelo

b) Primario paralelo, secundario serie

Fig. 3.15.5. Interconexión de transformadores

Nótese que en a) los devanados primarios están conectados en serie por lo que el voltaje aplicado se divide aplicándose la mitad a cada devanado, mientras que la intensidad de corriente es la misma. Sin embargo los devanados secundarios están conectados en paralelo por lo que la intensidad de corriente obtenida es el doble de la que circula por uno de los devanados mientras que el voltaje aplicado a la carga es el que corresponde a uno de los devanados.

En b) de la misma figura, al estar conectado los primarios en paralelo y los secundarios en serie el resultado obtenido es el contrario, o sea doble voltaje y mitad de corriente.

Es importante observar las marcas de polaridad de los transformadores al efectuar el conexionado puesto que si se invierte el conexionado de los secundarios se puede originar un cortocircuito pudiéndose quemar el transformador.

En ambos casos, la transferencia de potencia es la misma puesto que la potencia en el secundario del transformador será la misma que en el secundario para un transformador ideal, o sea, sin pérdidas. Realmente la potencia en el secundario del transformador será inferior a la del primario en una cantidad determinada por el **rendimiento** del transformador, que se define como la relación entre potencia del secundario y potencia del primario. El rendimiento de un transformador es siempre inferior a la unidad, siendo deseable se aproxime a la unidad lo más posible.

$$\rho = \frac{P_s}{P_p} \quad \left\{ \begin{array}{l} \rho = \text{rendimiento} \\ P_p = \text{potencia primario} \\ P_s = \text{potencia secundario} \end{array} \right.$$

### 15.6. TIPOS DE TRANSFORMADORES.

			Elevador
	Acoplamiento fuerte	}	Reductor
Tensión	Acoplamiento débil	}	Alta frecuencia
		}	Frecuencia intermedia
	Autotransformador	}	Elevador
		}	Reductor

Corriente

Adaptador de impedancias.

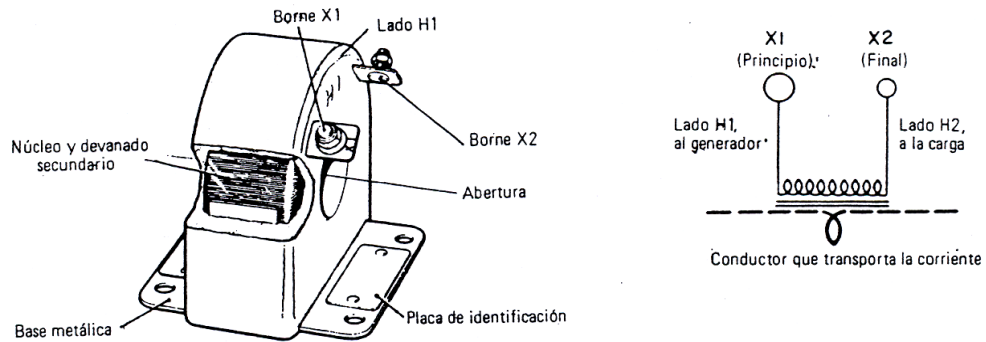
#### 15.6.1. Transformadores de tensión.

Los transformadores de tensión son los más utilizados. Según el tipo de acoplamiento hay dos clases de transformadores, los de acoplamiento fuerte y los de acoplamiento débil. Los primeros se utilizan en bajas frecuencias, llevan núcleo de hierro y prácticamente todo el flujo del primario atraviesa el secundario, siendo su inductancia mutua máxima. Los segundos usan núcleos de ferritas o de aire y tienen gran dispersión de flujo. Al grupo de acoplamiento fuerte pertenecen los transformadores de alimentación de los equipos electrónicos, los transformadores de audiofrecuencia y los grandes transformadores industriales. Al segundo grupo pertenecen los transformadores de radiofrecuencia usados en comunicaciones y navegación y los transformadores acopladores de impedancia.

#### 15.6.2. Transformadores de corriente.

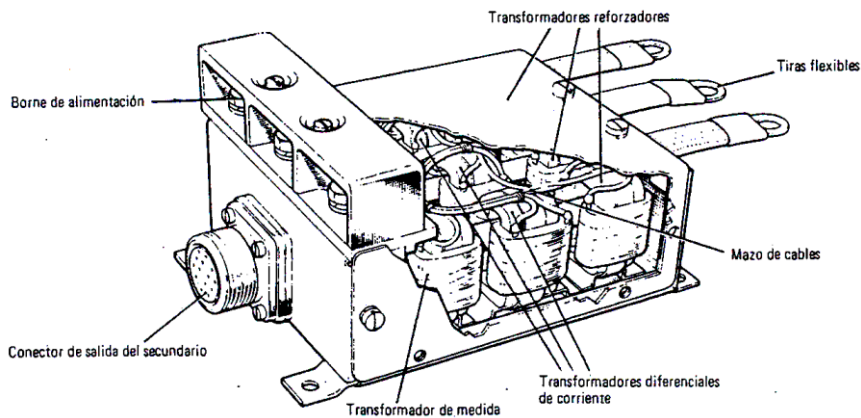
Los transformadores de corriente se usan comúnmente en sistemas de regulación y protección de generadores de CA y para conexionado de amperímetros de CA, como se verá más adelante. La figura 3.15.6 muestra un transformador de corriente típico, construido con un solo secundario devanado sobre un núcleo toroidal de hierro al silicio y cuyo primario es un cable pasante por la abertura central del núcleo. El cable puede precisar de dos o tres espiras, dependiendo de la intensidad de corriente a transportar ( a menor corriente más espiras ). La placa de identificación de esta unidad muestra, como característica más importante, la relación de transformación, p.e. 100 / 5, lo que significa que es utilizable en instalaciones cuya intensidad máxima sea de 100 A., en cuyo caso el secundario proporcionaría 5 A. Esta reducción en la intensidad permite el uso de amperímetros pequeños para medir grandes intensidades de corriente.





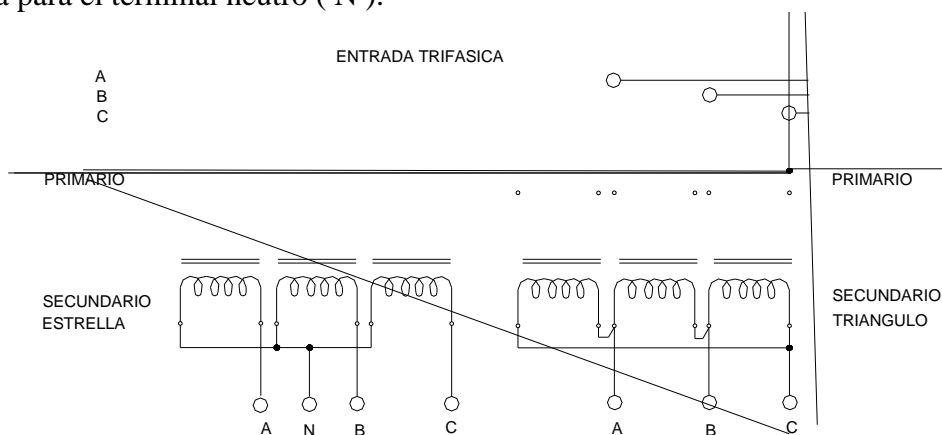
*Fig. 3.15.6. Transformador de corriente. Representación física y esquemática*

En algunos sistemas generadores de a bordo se combinan varios transformadores de corriente en un solo conjunto para proporcionar un medio de centralizar la situación del sistema eléctrico. La figura 3.15.7 muestra el aspecto físico de uno de estos conjuntos.



*Fig. 3.15.7. Transformador de corriente triple*

Si los transformadores son trifásicos, la conexión en primario hacia la fuente y en secundario hacia utilización se puede hacer en estrella (Y) o triángulo (Delta =  $\Delta$ ), como se muestra en la figura 3.15.8, donde se puede apreciar que al secundario en estrella se adiciona una nueva salida para el terminal neutro (N).

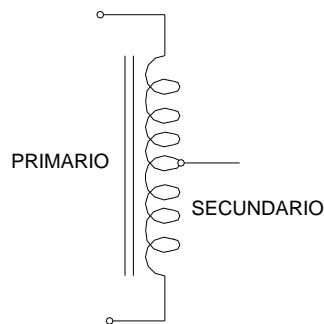


*Fig. 3.15.8. Transformadores trifásicos conectados en estrella y triángulo*

Los transformadores de acoplamiento débil se usan en frecuencias superiores a 20.000 Hz o radiofrecuencias. Las pérdidas por histéresis y Foucault crecen con la frecuencia por lo que es imposible emplear núcleos de hierro. Estos transformadores se fabrican con núcleos de aire o de ferritas (mezcla de materiales magnéticos en polvo que reducen considerablemente las pérdidas). Su misión es la de acoplar impedancias más que tensiones por lo que el número de espiras de primario y secundario viene determinado por la impedancia de los circuitos a acoplar, como se verá más adelante en este capítulo.

### 15.6.3. Autotransformador.

El autotransformador consta de un solo devanado que hace a la vez de primario y de secundario por lo que tiene el inconveniente de que ambos devanados y sus circuitos asociados no están aislados eléctricamente. Un diagrama esquemático se ve en la figura 3.15.9.



*Fig. 3.15.9 Autotransformador*

Los autotransformadores pueden tener una toma variable (VARIAC) lo que les permite obtener tensiones de entrada o salida de distintos valores. En cualquier caso, el flujo es el mismo en el primario que en el secundario por lo que las tensiones de entrada y salida son directamente proporcionales al número respectivo de espiras siendo de aplicación las fórmulas dadas para los transformadores

También se pueden emplear en circuitos que exijan una tensión trifásica a distintos niveles, como se muestra en la figura 3.15.10.

La figura siguiente, 3.15.10, corresponde a un autotransformador elevador aplicado al circuito antihielo de un parabrisas. Los tres devanados están conectados en estrella al sistema del alternador que genera 208 V. Las salidas están dispuestas de modo que se puedan emplear hasta cuatro niveles distintos de tensión.

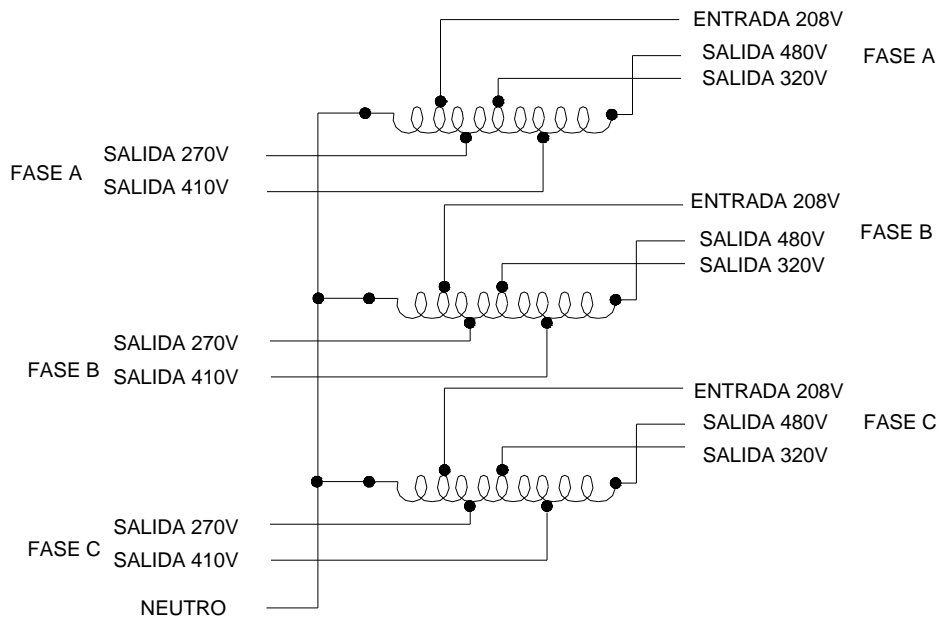


Fig. 3.15.10. Autotransformador trifásico con tomas diversas

#### 15.6.4 Transformador acoplador de impedancias.

Un transformador se puede emplear también como transformador acoplador de impedancias. Si se tiene en cuenta

$$P = \frac{E^2}{R}$$

Y que son iguales las potencias de primario y secundario de un transformador.

$$\frac{E_P^2}{R_P} = \frac{E_S^2}{R_S} \quad \text{o} \quad \frac{E_P^2}{E_S^2} = \frac{R_P}{R_S} = \frac{N_P^2}{N_S^2}$$

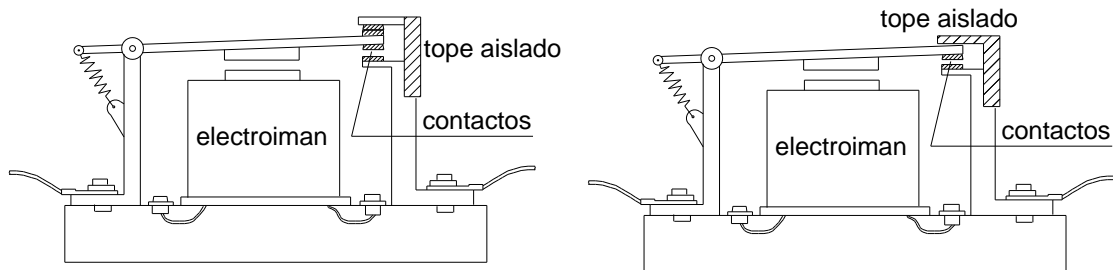
O sea

$$\frac{N_P^2}{N_S^2} = \frac{R_P}{R_S}$$

Con lo que se ve que se puede acoplar la impedancia de un circuito a la de otro circuito usando un transformador con el número de vueltas en la relación adecuada.

### 15.7. RELES.

Los relés son unos dispositivos electromecánicos que se componen esencialmente de una bobina o electroimán, una armadura y unos contactos eléctricos. La figura 3.15.11 muestra dos tipos convencionales de relés.

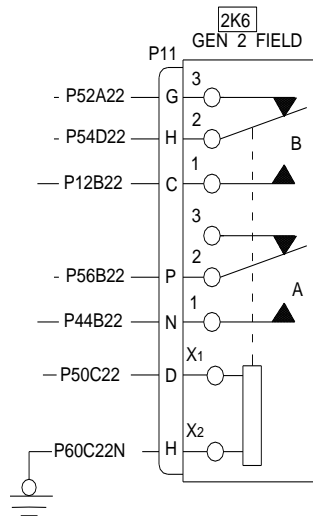


*Fig. 3.15.11. Relés convencionales*

El funcionamiento del relé es el siguiente: Cuando circula una corriente por la bobina se crea un campo magnético que atrae a la armadura, ésta pivota sobre su eje y cierra los contactos eléctricos. Cuando cesa la corriente que circula por el electroimán, cesa el campo magnético y la atracción a la armadura, que retorna a su posición inicial merced al muelle que tira de ella, abriéndose los contactos eléctricos. Un relé se define por los parámetros siguientes:

- a) Tensión de excitación y consumo de la bobina. P.e. alimentación a 28VCC ó a 120VCA con consumo de 0,28 W ó 3,2 VA etc.
- b) Número de contactos y tipo de los mismos. P.e. relé de 4 contactos normalmente abiertos (NA) (NO = normally open) y 3 contactos normalmente cerrados (NC) (NC = normally closed) etc. Los contactos 3 y 2 son NC mientras que los contactos 1 y 2 son NO.
- c) Intensidad máxima admisible en los contactos. P.e. 6A o 10 A etc.
- d) Tipo de trabajo a desarrollar por el relé. Se dice que un relé es del tipo intermitente cuando está cerrado 2 minutos o menos, mientras que se dice que es del tipo continuo cuando está cerrado más de 2 minutos.

La figura 3.15.12 muestra el diagrama esquemático de un relé. Un relé se representa siempre en posición de reposo, lo que significa que cuando esté actuado los contactos ocuparán la posición contraria a la representada.



*Fig. 3.15.12. Relé. Representación esquemática*

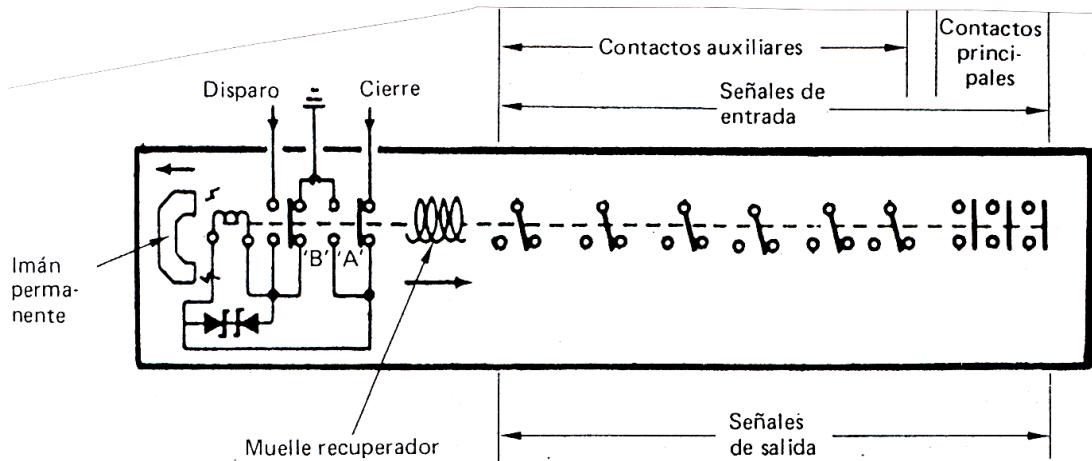
La forma habitual de nombrar los contactos de un relé es la siguiente:

- Los terminales de la bobina del relé se nombran con  $X_1$  y  $X_2$ .
- Los bloques de contactos se nombran con letras mayúsculas, empezando por el más próximo a la bobina, que tendrá la letra **A**.
- Los contactos de un bloque de contactos se nombran con números, correspondiendo el dígito 1 al contacto de trabajo, el dígito 2 al contacto móvil y el dígito 3 al contacto de reposo.

La figura 3.15.14 muestra un circuito formado por tres relés, ON, READY y FAIL simulando un sistema, en el que se enciende la luz READY cuando se aplica tensión, se apaga la luz READY y se enciende la luz ON cuando se pasa el interruptor OFF – ON a la posición ON, que se enciende la luz FAIL y se apaga la luz ON, cuando se provoca un fallo (simulado presionando y liberando el pulsador FAIL) y que se anula el fallo presionando y liberando el pulsador RESET, en cuyo momento se apaga la luz FAIL y se enciende la luz ON, si el interruptor continuaba en la posición ON.

### 15.8. CONTACTORES.

Otro tipo de relé es el llamado contactor, que se muestra en la figura 3.15.13.



*Fig. 3.15.13 Contactor*

Cuando se aplica una tensión de CC a la patilla “cierre” del contactor, la corriente circula a través de los contactos de reposo A y B y la bobina a masa, se cierran los contactos atraídos por la bobina y el muelle queda oprimido. El imán permanente posee el campo magnético suficiente para mantener los contactos cerrados en oposición al muelle. Cuando se aplica una tensión a la patilla disparo, circula una corriente desde esa patilla, contacto B, bobina del contactor, contacto A y masa haciendo que la bobina origine un campo magnético contrario al que originó en el cierre y por tanto contrario al del imán permanente. El campo magnético resultante se ha debilitado lo suficiente como para que no pueda mantener al muelle comprimido y se liberan los contactos.

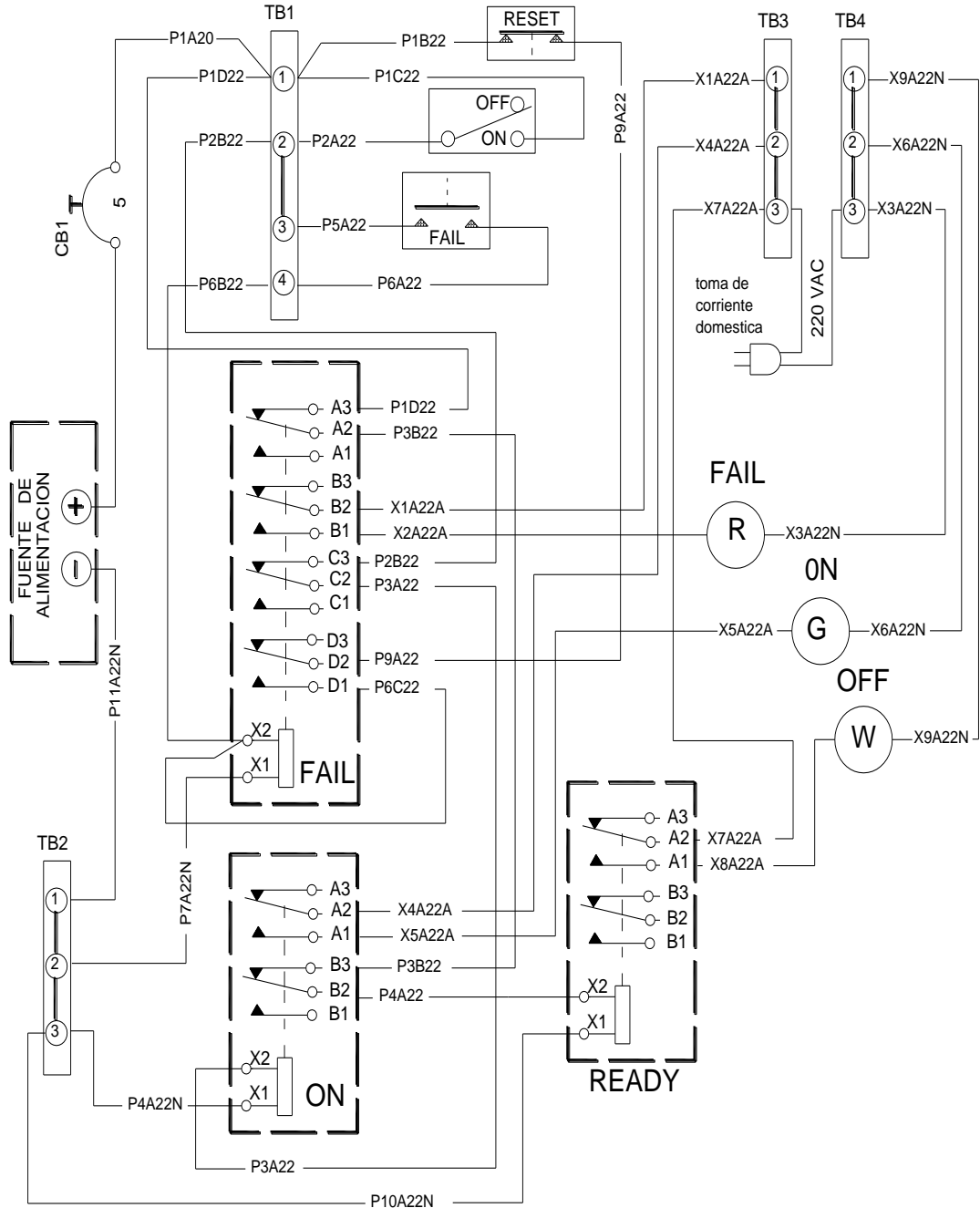
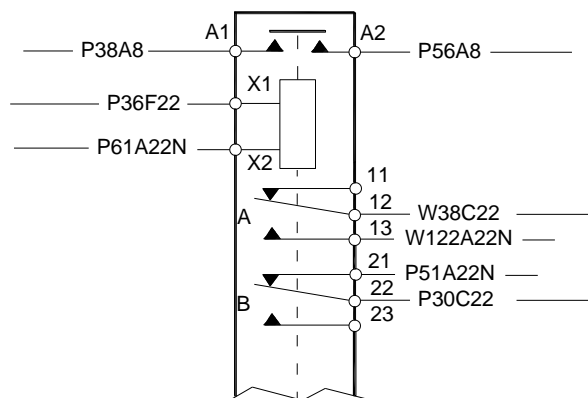


Fig. 3.15.14. Circuito con relés

Los contactores se usan normalmente en el circuito de distribución de alimentación del avión para conectar las líneas de alimentación a las barras de distribución o para la interconexión de las barras.

Otro modelo de contactor se muestra en la figura 3.15.15. Dispone de los terminales A1 y A2 para el contactor, consumo alto, cable de la galga AWG 8, y de los contactos auxiliares A y B, ambos de reposo trabajo, que cuando se energiza el relé o contactor hace contacto la lámina 12 con el trabajo 13, quedando libre el reposo 11 e igualmente hace contacto la lámina 22 con el trabajo 23, quedando libre el reposo 21.



*Fig. 3.15.15. Contactor con contactos auxiliares.*