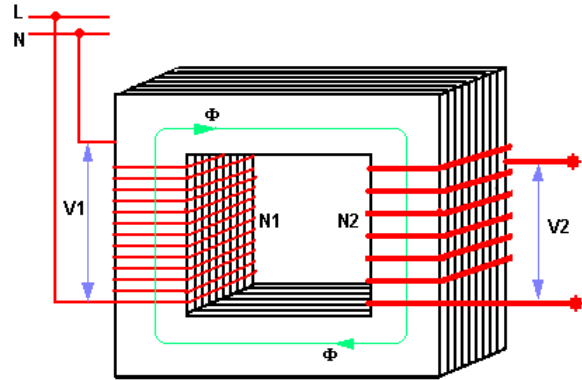


## TEORIA UTIL PARA ELECTRICISTAS EL TRANSFORMADOR

### **Principio de funcionamiento.**

Sea un circuito magnético constituido por dos columnas y dos culatas en el que han sido arrollados dos circuitos eléctricos, uno constituido por  $N_1$  espiras es conectado a la fuente de energía eléctrica de corriente alterna y recibe el nombre de bobinado primario. Un segundo bobinado llamado secundario constituido por  $N_2$  espiras permite conectar a sus dos extremos libres un circuito de utilización, al que cede la energía eléctrica absorbida por el bobinado primario. El efecto combinado de ambos bobinados recorridos por sus respectivas corrientes determina una fuerza magnetomotriz que da lugar a que se establezca un flujo de líneas de fuerza alterno senoidal en el circuito magnético del transformador. Este flujo, que es común para los dos bobinados, sirve para transmitir la energía eléctrica de uno a otro. Por otra parte, por ser un flujo variable hace que en ambos bobinados se genere una fuerza electromotriz inducida. Ahora bien, la fuerza electromotriz generada en el bobinado primario al igual que en un motor es una verdadera fuerza contraelectromotriz mientras que la que se genera en el bobinado secundario es aprovechada en el circuito exterior de utilización.



### **Propiedades.**

1. la relación entre las tensiones del primario y secundario es igual a la relación entre los números de espiras de estos arrollamientos.
2. se pueden utilizar como elevadores o reductores, son reversibles.
3. son autorreguladores, o sea, que si la AT de un transformador funciona como receptor y la BT como generador, la potencia consumida por la AT es proporcional a la demandada por la BT, y viceversa. Veamos las dos opciones:
  - a. cuando no se demanda potencia del secundario, transformador funcionando en vacío o secundario en circuito abierto:
    - la corriente primaria pasa por una inductancia muy grande,
    - intensidad pequeña y
    - factor de potencia próximo a cero, por lo que
    - $\phi$  está cercano a  $90^\circ$ ,
    - la intensidad está retrasada  $90^\circ$  respecto a la tensión y
    - la potencia será prácticamente nula.
  - b. funcionando con carga:
    - la corriente secundaria ejerce una acción desmagnetizante de sentido contrario al de la corriente primaria
    - la fem inducida en el circuito primario tiende a disminuir de modo que
    - si la tensión en bornas se mantiene invariable
    - la intensidad aumenta ya que esta fem se opone a la tensión de alimentación. De esta forma
    - el flujo resultante se mantiene sensiblemente constante. Recíprocamente
    - cuando la intensidad demandada del secundario disminuye
    - la intensidad absorbida por el primario disminuye también.

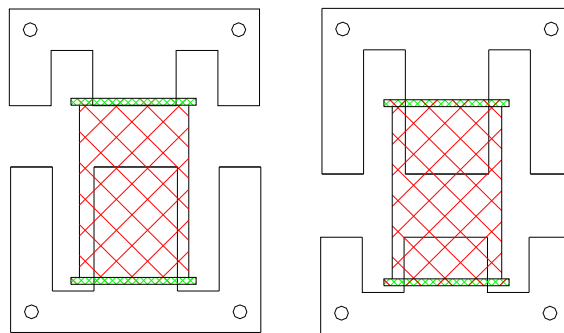
## TEORIA UTIL PARA ELECTRICISTAS EL TRANSFORMADOR

### **Rendimiento y ventajas.**

1. la autorregulación actúa de tal forma que el rendimiento de los transformadores es muy elevado, alcanzando hasta el 99%.
2. al no tener piezas en movimiento son muy robustos y los problemas de aislamiento se resuelven con facilidad.
3. por ser reversibles son elementos esenciales en la transmisión de la energía eléctrica.

### **Análisis constructivo.**

- Núcleo. Las chapas de hierro dulce al silicio (3,5 a 4 %) que se emplean tienen un espesor de décimas de milímetro, están aisladas entre sí por hojas de papel de centésimas de espesor o por barniz. Para poder emplear bobinas circulares con el mayor aprovechamiento posible de espacio, las chapas de los núcleos están dispuestas en paquetes de sección en forma de cruz (escalones)
- Baja tensión. Para que sea más fácil el bobinado de BT se coloca en el interior de la de AT. Cuando la sección de los hilos ha de ser grande se les sustituye por conductores rectangulares para no desaprovechar espacio.
- Alta tensión. El arrollamiento es generalmente de bobinas superpuestas (galletas) agrupadas en serie. La primera y la última tienen un aislamiento más fuerte, capaz de resistir sobretensiones accidentales (bobinas de choque).
- Tomas o derivaciones de regulación. Siendo la tensión proporcional al nº de espiras es posible regularla poniendo fuera tomas que permitan una variación del 5 %.
- Refrigeración. Las pérdidas se traducen en elevación de temperatura que no debe pasar de un cierto valor a fin de que no se deteriore el aislante. Para pequeñas potencias es suficiente el enfriamiento natural por radiación de calor. Para potencias medias se utiliza el baño de aceite. En potencias elevadas el baño de aceite se hace enfriar a su vez por otro circuito circulante de agua o aceite.



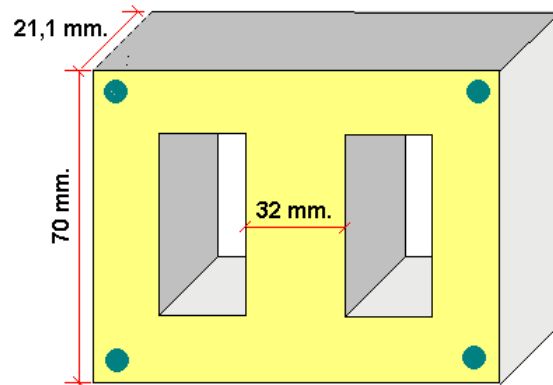
las chapas magnéticas se intercalan para disminuir las pérdidas en el hierro

### **Ejercicio práctico.**

Disponemos de un circuito magnético realizado con chapas unidas como el de la figura para construir un transformador cuyas tensiones primarias y secundarias deberán ser 127 y 220 voltios.

TEORIA UTIL PARA ELECTRICISTAS  
EL TRANSFORMADOR

1. sección geométrica del núcleo magnético:  
 **$S_g = 32 \times 21.1 = 675,2 \text{ mm}^2 = 6,752 \text{ cm}^2$ .**
2. sección neta del núcleo magnético.  
Se calcula multiplicando la sección geométrica por un coeficiente dependiente del apriete y aislamiento entre chapas:  
 **$S_{nt} = 0.9 \times 6,752 = 6,07 \text{ cm}^2$ .**



3. potencia aparente del transformador:  
 **$P_1 = S_{nt}^2 : \alpha^2 = 6,07^2 : 0,8^2 = 57,57 \text{ va (voltiamperios)}$**

Siendo  $\alpha$  un coeficiente dependiente de la calidad de la chapa magnética. Cuando la permeabilidad es muy alta el valor es 0.9.

Pero como hay que tener en cuenta las pérdidas de potencia en el núcleo, la potencia aparente será:

**$P_a = P_1 - 10\% - 4\% = 57,57 - 5,757 - 2,3 = 49,51 \text{ va}$**

4. numero de espiras devanado primario  $N_1$ :  
 **$N_1 = (E_1 \times 10^8) : (4,44 \times f \times \beta \times s) = 127 \times 10^8 : (4,44 \times 50 \times 10^5 \times 6,07) = 950 \text{ espiras}$**

5. espiras por voltio E:v  
 **$950 : 127 = 7,48$**

6. nº espiras devanado secundario  $N_2$   
 **$N_2 = 7,48 \times 220 = 1650 \text{ espiras}$ .**

7. intensidad primario  
 **$I_p = P : V_p = 48,6 : 127 = 0,38 \text{ A}$ .**

8. sección devanado primario  
 **$s_1 = I_p : D = 0,39 : 3,5 = 0,156 \text{ mm}^2$ .**  
Siendo D densidad de corriente (ver tabla)

9. diámetro devanado primario  
 **$\varnothing_p = \sqrt{(4s:\pi)} = \sqrt{(4 \times 0,108 : 3,1416)} = 0,3 \text{ mm}$ .**

10. intensidad secundario  
 **$I_s = P : V_s = 48,6 : 220 = 0,22 \text{ A}$ .**

11. sección devanado secundario  
 **$s_2 = I_s : D = 0,22 : 3,5 = 0,062 \text{ mm}^2$ .**  
Siendo D densidad de corriente (ver tabla)

12. diámetro devanado secundario  
 **$\varnothing_s = \sqrt{(4s:\pi)} = \sqrt{(4 \times 0,062 : 3,1416)} = 0,27 \text{ mm}$ .**

D densidad de corriente	
potencia en VA	densidad A/mm <sup>2</sup>
10 a 50	4
51 a 100	3,5
101 a 200	3
201 a 500	2,5
501 a 1000	2
1001 a 1500	1,5

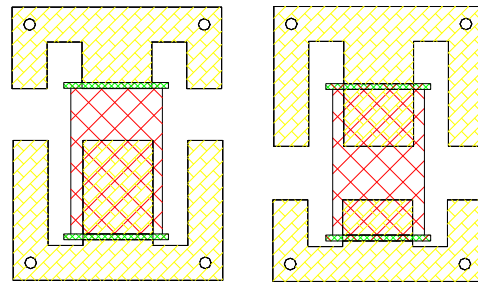
## TEORIA UTIL PARA ELECTRICISTAS EL TRANSFORMADOR

13. diámetro comercial  
 **$\varnothing_s = 0,25 \text{ mm.}$**

14. en resumen, los datos suficientes para la construcción del transformador son  
 **$N_p = 950 \text{ espiras}$**   
 **$N_s = 1650 \text{ espiras}$**   
 **$\varnothing_p = 0,30 \text{ mm.}$**   
 **$\varnothing_s = 0,25 \text{ mm.}$**

### **Construcción de las bobinas.**

Los bobinados se enrollarán sobre un carrete de cartón. Antes de colocar el carrete en el bobinador deberemos asegurarnos de que el entrehierro está bien relleno, con el fin de que cuando liemos el hilo el entrehierro no se contraiga y después no quepa en la armadura de chapa, o si está demasiado ajustado después pueda cortar alguna espira al introducirlas. Para



conseguir un aislamiento fiable del circuito eléctrico se colocará cada cierto número de espiras correspondiente a un cierto valor de tensión, un papel aislante entre capas, de modo que el conjunto del bobinado va a resultar dividido por un número de capas de espiras y cada una de ellas comprenderá aproximadamente la misma tensión. En el caso de la práctica que nos ocupa se ha colocado un papel aislante cada 40 voltios es decir cada 300 espiras. Los terminales de las bobinas, tanto principios como finales, se introducen por unos agujeros en la solapa del carrete hasta el exterior. Para evitar que tirando de estas puntas se deshaga la bobina, se dispone de unas cintas de algodón sujetas al propio arrollamiento. Una vez se ha terminado la bobina se comprueba mediante una serie la continuidad del hilo, se van montando las chapas magnéticas alternativamente solapándolas para conseguir una reluctancia reducida y una mejor sujeción del conjunto. La operación siguiente es apretar el conjunto de chapas mediante tornillos aislando estos de las chapas mediante fundas y arandelas de papel baquelizado. Si el material de apriete es diferente al de la chapa de hierro dulce, por ejemplo de latón, no es preciso aislarlo. La razón de este aislamiento es la aparición de corrientes inducidas que se traducen en pérdidas en el hierro. Una vez montado el transformador le hacemos una serie de pruebas que nos darán la seguridad de su funcionamiento con un rendimiento adecuado.

### **Pruebas.**

1. continuidad con una serie de los bobinados.
2. aislamiento con un méguer se mide la resistencia entre los bobinados y chapas magnéticas, en caliente ya que en frío la resistencia es infinito.

Resistencia aislamiento (megaohmios) = tensión en bornas (voltios) :  
[potencia (kilowatios) + 1000]

$$Ra = \frac{V}{P + 1000}$$

TEORIA UTIL PARA ELECTRICISTAS  
EL TRANSFORMADOR

3. resistencia de los devanados en frío con el puente de Wheastone.
4. relación de transformación en vacío y en carga.

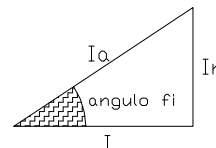
$$m = V_1:V_2 = N_1:N_2 = I_2:I_1$$

5. prueba de vacío para conocer la intensidad de vacío  $I_0$  y las pérdidas en el hierro.

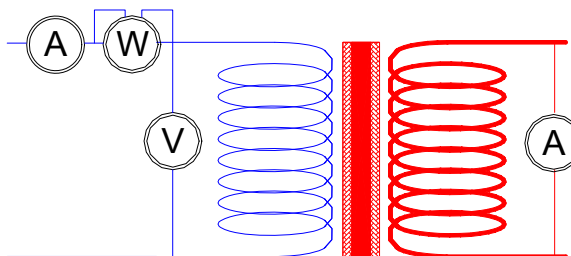
$$\cos \varphi = \frac{W}{V \times I}$$

$$I = I_a \times \cos \varphi$$

$$P = R \times I^2$$



6. ensayo de cortocircuito para conocer las pérdidas en el cobre y la tensión de cortocircuito. Montando el esquema de la figura y con tensión inicial cero iremos subiéndola hasta que el amperímetro situado en el secundario, que lo cortocircuita, nos marque la intensidad nominal. El watímetro nos marca las pérdidas en el cobre, el voltímetro la tensión de cortocircuito y el amperímetro la intensidad aparente.



7. rendimiento, existen dos métodos:

- a. método por pérdidas separadas:

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{P_u + P_{fe} + P_{cu}}$$

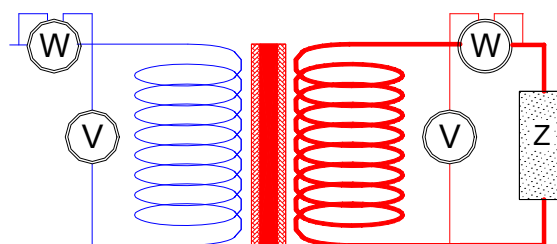
rendimiento = potencia útil : potencia absorbida (potencia útil + potencia perdida en el hierro + potencia perdida en el cobre)

- b. método directo utilizando el montaje de la figura

$$\eta = \frac{W1}{W2}$$

W1 watímetro primario

W2 watímetro secundario



Los rendimientos máximos se presentan cuando resultan iguales las pérdidas en el cobre y en el hierro.

## TEORIA UTIL PARA ELECTRICISTAS EL TRANSFORMADOR

### **Autotransformador. Definición.**

Es el transformador en que los devanados primario y secundario están compartidos, teniendo una o varias derivaciones con menor numero de espiras.

### **Reversible.**

Se puede alimentar por el primario o por el secundario indistintamente.

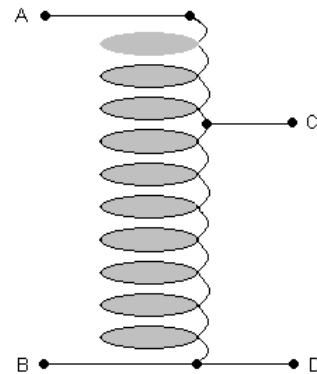
Se llama **reductor** o **elevador** en función de si se transforma a menor o a mayor tensión.

### **Funcionamiento.**

En la imagen observamos un bobinado de 10 espiras.

Si alimentamos por A-B con una tensión de 100 voltios, cada espira corresponderá a 10 voltios.

Por lo tanto entre C-B, que hay 7 espiras, habrá 70 voltios de salida.



### **Ventajas sobre el transformador.**

- Menor cantidad de cobre.
- Menor dimensiones del núcleo magnético para una misma potencia.
- Menor peso, tamaño y precio.

### **Inconvenientes sobre el transformador.**

- No existe separación galvánica del primario y el secundario.
- Un cortocircuito en el bobinado redunda en una sobretensión a los receptores.

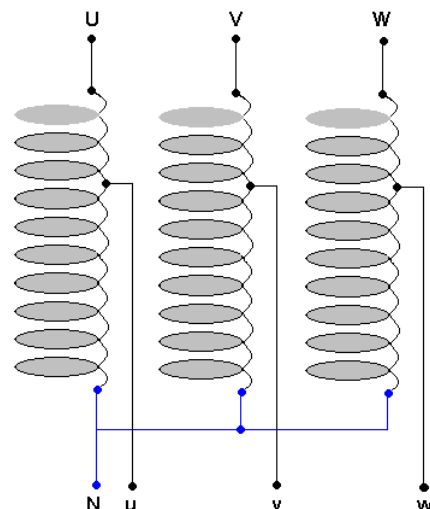
### **Aplicaciones.**

- En los casos que no sea preciso aislar eléctricamente el circuito primario del secundario.
- Cuando la relación de transformación está entre 0.5 y 2.
- Arrancadores de motores.

### **Autotransformador trifásico.**

Cada fase está formada por un autotransformador monofásico unidas en estrella.

Vemos en la imagen los bornes de la parte de tensión máxima U, V, W y los de tensión mínima u, v, w. El neutro N se utilizará indistintamente para la entrada, para la salida o para ambas.



TEORIA UTIL PARA ELECTRICISTAS  
EL TRANSFORMADOR

**Análisis constructivo. Ejercicio práctico.**

Disponemos de un circuito magnético realizado con chapas unidas como el de la figura para construir un autotransformador cuyas tensiones primarias y secundarias deberán ser 127 y 220 voltios.

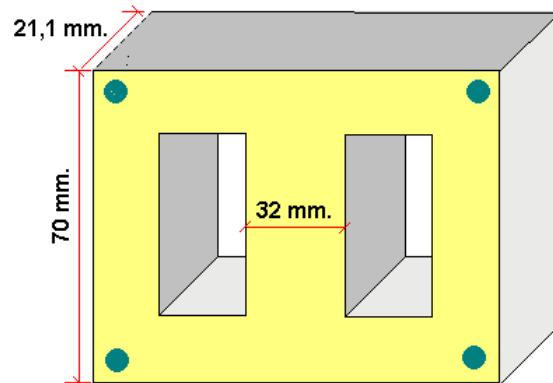
15. sección geométrica del núcleo magnético:

$$S_g = 32 \times 21,1 = 675,2 \text{ mm}^2 = 6,752 \text{ cm}^2.$$

16. sección neta del núcleo magnético.

Se calcula multiplicando la sección geométrica por un coeficiente dependiente del apriete y aislamiento entre chapas:

$$S_{nt} = 0,9 \times 6,752 = 6,07 \text{ cm}^2.$$



17. potencia aparente suministrable por el núcleo si fuese de un transformador:

$$P_1 = S_{nt}^2 : \alpha^2 = 6,07^2 : 0,8^2 = 57,57 \text{ va (voltiamperios)}$$

Siendo  $\alpha$  un coeficiente dependiente de la calidad de la chapa magnética. Cuando la permeabilidad es muy alta el valor es 0.9.

Pero como hay que tener en cuenta las pérdidas de potencia en el núcleo, la potencia aparente será:

$$P_a = P_1 - 10 \% - 4 \% = 57,57 - 5,757 - 2,3 = 49,51 \text{ va}$$

18. potencia suministrable por el autotransformador:

$$P_z = (P_a \times V_1) : (V_1 - V_2) = (49,51 \times 220) : (220 - 127) = 117,12 \text{ va}$$

19. numero de espiras devanado secundario  $N_s$ :

$$N_s = (E_s \times 10^8) : (4,44 \times f \times \beta \times 6) = 127 \times 10^8 : (4,44 \times 50 \times 10^5 \times 6,07) = 950 \text{ espiras}$$

20. espiras por voltio  $E:v$

$$950 : 127 = 7,48$$

21. nº espiras devanado serie o de paso  $N_p$

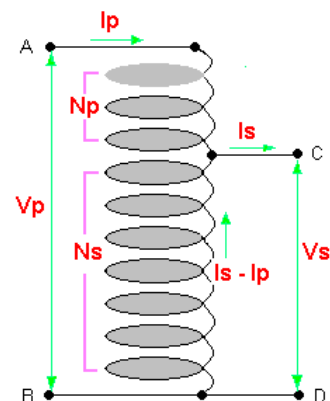
$$N_p = (N_{total} - N_s) \times E : v = [(220 \times 7,48) - 950] \times 7,48 = 700 \text{ espiras.}$$

22. intensidad secundario

$$I_s = P_z : V_s = 118 : 127 = 0,93 \text{ A.}$$

23. intensidad primario

$$I_p = P_z : V_p = 118 : 220 = 0,54 \text{ A.}$$



TEORIA UTIL PARA ELECTRICISTAS  
EL TRANSFORMADOR

24. intensidad devanado común  $I_s - I_p$   
 **$I_s - I_p = 0,93 - 0,54 = 0,39 \text{ A.}$**
25. sección devanado común  
 **$s = (I_s - I_p) : D = 0,39 : 2,5 = 0,156 \text{ mm}^2.$**
26. diámetro devanado común  
 **$\varnothing_{s-p} = \sqrt{(4s:\pi)} = \sqrt{(4 \times 0,156 : 3,1416)} = 0,44 \text{ mm.}$**
27. diámetro comercial  
 **$\varnothing_{s-p} = 0,45 \text{ mm.}$**
28. sección devanado serie  
 **$S_p = I_p : D = 0,54 : 2,5 = 0,216 \text{ mm}^2.$**
29. diámetro devanado serie  
 **$\varnothing_p = \sqrt{(4s:\pi)} = \sqrt{(4 \times 0,216 : 3,1416)} = 0,52 \text{ mm.}$**
30. diámetro comercial  
 **$\varnothing_p = 0,50 \text{ mm.}$**
31. en resumen, los datos suficientes para la construcción del autotransformador son  
 **$N_p = 700 \text{ espiras}$**   
 **$N_s = 950 \text{ espiras}$**   
 **$\varnothing_p = 0,50 \text{ mm.}$**   
 **$\varnothing_s = 0,45 \text{ mm.}$**

La construcción práctica es idéntica en cuanto a los métodos que la de los transformadores, la diferencia está en las conexiones de los devanados.

**Pruebas y ensayos.**

Una vez construido habrá que someterlo a las siguientes pruebas para comprobar su buen rendimiento.

1. prueba de continuidad de los devanados con un polímetro.
2. prueba de aislamiento con un méguer entre los bobinados y circuito magnético.
  - a. En frío la resistencia debe ser infinita.
  - b. En caliente será:

**$R_a = V_b : (P + 1000) = M\Omega$**

Siendo,

$V_b$  tensión en bornas

$P$  potencia en Kw o Kva

Resultado en megaohmios.

3. resistencia de los devanados con un puente de Wheastone o un polímetro u óhmetro suficientemente sensible.
4. relación de transformación, haciendo medida de tensiones con un voltímetro en vacío y en carga.

**$m = V_1 : V_2 = N_1 : N_2 = I_2 : I_1$**



## TEORIA UTIL PARA ELECTRICISTAS EL TRANSFORMADOR

5. prueba de vacío para conocer las intensidad de vacío  $I_0$  y las pérdidas en el hierro por efecto Joule, utilizando un voltímetro, un amperímetro y un vatímetro.
6. rendimiento, midiendo a plena carga las potencias mediante watímetro a la entrada y a la salida del autotransformador. El rendimiento máximo se presenta cuando son iguales las pérdidas en el cobre y en el hierro.

$$\mu = \text{potencia medida salida} : \text{potencia medida entrada} \times 100$$

### **Transformadores de medida.-**

Los arrollamientos primario y secundario están separados entre sí y transforman la corriente alterna en otra corriente u otra tensión de valor adecuado al instrumento de medida.

En instalaciones de alta tensión separan los instrumentos de medida de ésta, de manera que la lectura se hace sin peligro.

Otra ventaja es que protege al instrumento medidor de sobretensiones y sobreintensidades de la red.

La eficiencia depende de la relación de transformación así como de la igualdad del ángulo de fase entre corriente y tensión del secundario.

Relación de transformación:

$$m = \frac{V1}{V2} = \frac{N1}{N2}$$

V1 N1 tensión y nº espiras primario

V2 N2 tensión y nº espiras secundario

### **Transformador de intensidad.-**

Se emplean para medidas de intensidad elevadas.

Las intensidades en primario y secundario  $I_1$  y  $I_2$  tienen una relación inversa a la tensión y nº de espiras:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

El bobinado del primario tiene pocas espiras, incluso 1 sola, se conecta en serie con la carga.

El bobinado secundario tiene muchas espiras, dependiendo del fondo de escala del amperímetro al que va conectado.

**Ejemplo:**

Características del transformador

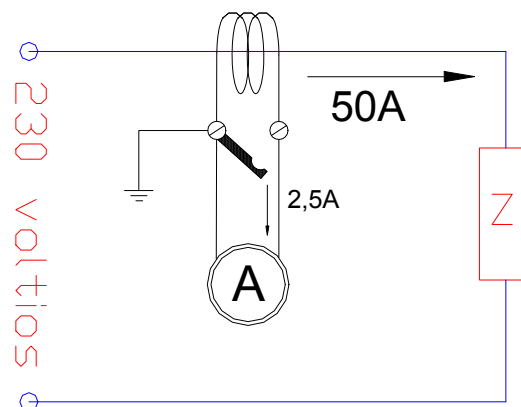
$$I_1 = 100 \text{ A}$$

$$I_2 = 5 \text{ A}$$

$$m = \frac{5}{100} = \frac{1}{20} = 0,05$$

El valor del secundario de la figura,  $I_2 =$

$$2,5 \text{ A} \text{ por lo tanto, } I_1 = \frac{0,05}{2,5} = 50 \text{ A}$$



### **PRECAUCIONES.-**

El circuito de secundario debe quedar siempre cerrado, por el propio bobinado del amperímetro o por un puente. En caso de sustitución del amperímetro puentear la salida

## TEORIA UTIL PARA ELECTRICISTAS EL TRANSFORMADOR

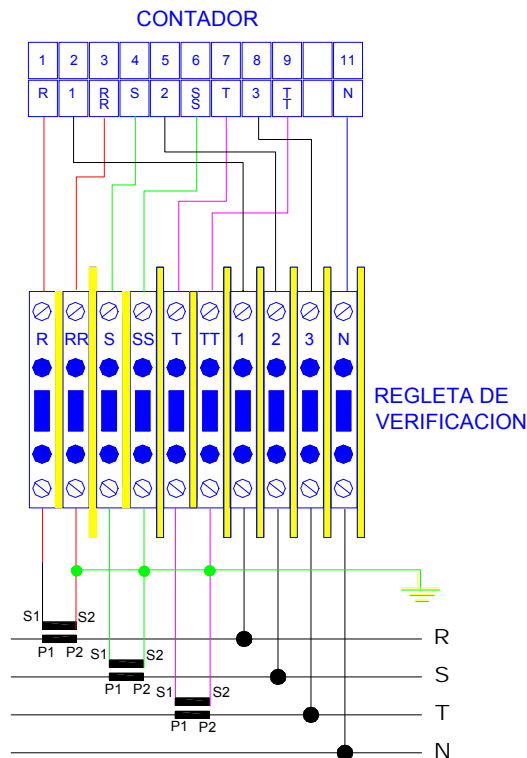
del transformador. Secundario abierto provoca la destrucción por calentamiento del transformador.

Se debe conectar a tierra el secundario.

Esquema de conexionado del equipo de medida de energía en Baja Tensión según normativa particular de la compañía Endesa.

Se colocarán transformadores de intensidad de un calibre dependiente de la potencia que se contrate, según la siguiente tabla.

intensidad del trafo (amperios)		relación transf. m	rango de potencia a medir (watts)	
prim.	secund.		desde	hasta
100	/5	1/20	55.420	103.920
200	/5	1/40	62.352	207.840
500	/5	1/100	155.880	519.600
1000	/5	1/200	311.760	1.039.200
2000	/5	1/400	623.520	2.078.400



### **Transformador de tensión.-**

Se emplean para medidas de media y alta tensión normalmente.

Las tensiones en primario y secundario V1 y V2 tienen una relación inversa a la intensidad y directa al nº de espiras:

$$\frac{I2}{I1} = \frac{V1}{V2} = \frac{N1}{N2}$$

### **PRECAUCIONES.-**

Al contrario que con el de intensidad, no unir bornes del bobinado secundario, hay diferencia de potencial y produciría un cortocircuito. Se debe conectar a tierra el secundario.

