



GUÍA DE ASIGNATURA DE MAQUINAS DC

TECNOLOGÍA SUPERIOR EN ELECTRICIDAD

**MAYO 2022
AZOGUES - ECUADOR**

Descripción de la Asignatura

La materia Máquinas DC es una asignatura de carácter teórico práctico que corresponde al eje de formación profesional dentro de la malla curricular de las carreras técnicas de nivel superior encaminadas a la formación de seres competentes y comprometidos con el estudio y conocimiento de los motores y generadores de corriente continua y los transformadores de distribución. La asignatura pretende fomentar el aprendizaje considerando elementos que van desde a la modelación matemática hasta el comportamiento en el laboratorio de las máquinas DC y de los transformadores y autotransformadores sometidos a cargas de origen eléctrico y mecánico ; siendo estos contenidos de importancia para que el futuro profesional de la electricidad pueda desempeñarse adecuadamente en un ambiente empresarial tanto público como privado que esté de acuerdo con la época y los avances tecnológicos del nuevo milenio.

Tabla de Contenidos

Capítulo 1 Introducción a los Sistemas Electromecánicos	1
1.1 Máquinas de Corriente continua generalidades	1
1.2 Bobinados de las máquinas de corriente continua	1
Capítulo 2 Aplicación y selección de las máquinas de corriente continua	2
2.1 Aplicación y selección de Generadores DC Shunt, serie y compound	2
2.2 Aplicación y selección de motores DC Shunt, serie y compound	2
2.3 Relaciones fundamentales y características de funcionamiento.....	2
Capítulo 3 Transformadores	2
3.1 Transformadores Monofásicos	2
3.2 Transformadores Trifásicos	2
3.3 Autotransformadores	2

Capítulo I

Introducción a los Sistemas Electromecánicos.

Resultado de Aprendizaje: Entiende el principio de funcionamiento de las máquinas eléctricas de corriente continua, experimenta con las diferentes conexiones y configuraciones aplicándolos a diferentes entornos que pudiera presentarse en el ámbito práctico.

Analiza desde el punto de vista técnico las diferencias entre valores medidos en el laboratorio y los obtenidos en la teoría y se obtiene conclusiones al respecto

1.1 Máquinas de corriente continua generalidades

Las diferentes etapas en que han sido desarrollados los convertidores electromagnéticos de energía (máquinas eléctricas que transforman energía mecánica en eléctrica y viceversa) desde que en 1832 apareció el primer artilugio hasta nuestros días, han sido muy valiosas si analizamos las aportaciones que éstos han prestado al desarrollo tecnológico e industrial de la humanidad.

El fundamento teórico en el que se basa el funcionamiento de los convertidores electromecánicos se encuentra en los tres principios fundamentales de la inducción electromagnética, que podemos resumirlos en:

- Una corriente eléctrica que circula por un conductor arrollado a un núcleo metálico de hierro o acero hace que éste se comporte como un imán.
- Las corrientes eléctricas ejercen entre sí fuerzas a distancia.
- Cuando se mueve un conductor en el seno de un campo magnético, se produce (induce) sobre él una corriente eléctrica.

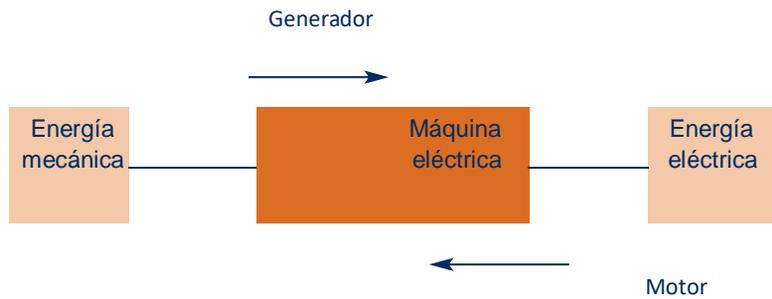
Estos principios constituyen la génesis de las máquinas eléctricas y son debidos, en gran medida, al trabajo de tres grandes hombres de ciencia:

- Dominique François Jean Arango (1786-1853).
- André Marie Ampere (1775-1836).
- Michael Faraday (1791-1867).

1.1.1 Definición y clasificación de las máquinas eléctricas rotativas

Se entiende por máquina eléctrica al conjunto de mecanismos capaces de generar, aprovechar o transformar la energía eléctrica.

Si la máquina convierte energía mecánica en energía eléctrica se llama generador, mientras que si convierte energía eléctrica en energía mecánica se denomina motor. Esta relación se conoce como **principio de conservación de la energía electromecánica.**

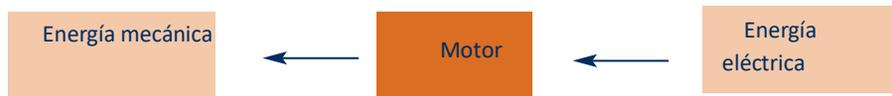


Teniendo en cuenta lo que hemos estudiado hasta el momento, podemos clasificar las máquinas eléctricas rotativas en:

- Generadores. Transforman la energía mecánica en energía eléctrica.



- Motores. Transforman la energía eléctrica en energía mecánica.



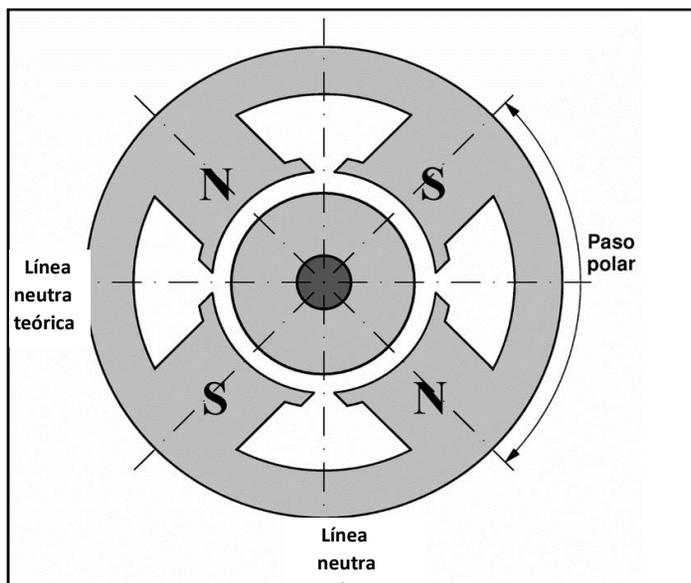
Podemos realizar otra clasificación de las máquinas eléctricas teniendo en cuenta el tipo de corriente eléctrica que utilizan, el número de fases, etc., tal como se muestra en la Tabla 1.1

Máquina eléctrica	Tipo de corriente	
	Corriente continua	Corriente alterna
Generadores	Dinamo (con excitación) <ul style="list-style-type: none"> Independiente Serie Shunt o derivación Compound 	Alternador <ul style="list-style-type: none"> Monofásico Trifásico Polos lisos Polos salientes
Motores	Motor (con excitación) <ul style="list-style-type: none"> Independiente Serie Shunt o derivación Compound 	Monofásicos <ul style="list-style-type: none"> Inducción <ul style="list-style-type: none"> Jaula <ul style="list-style-type: none"> Fase partida Condensador Espira de sombra Rotor devanado <ul style="list-style-type: none"> Repulsión Repulsión en arranque Repulsión-inducción Síncrono <ul style="list-style-type: none"> Histéresis Reluctancia Imán permanente
		Polifásicos <ul style="list-style-type: none"> Inducción <ul style="list-style-type: none"> Jaula de ardilla Rotor devanado
		Universales <ul style="list-style-type: none"> Síncronos

Tabla 1.1. Clasificación general de las máquinas eléctricas rotativas

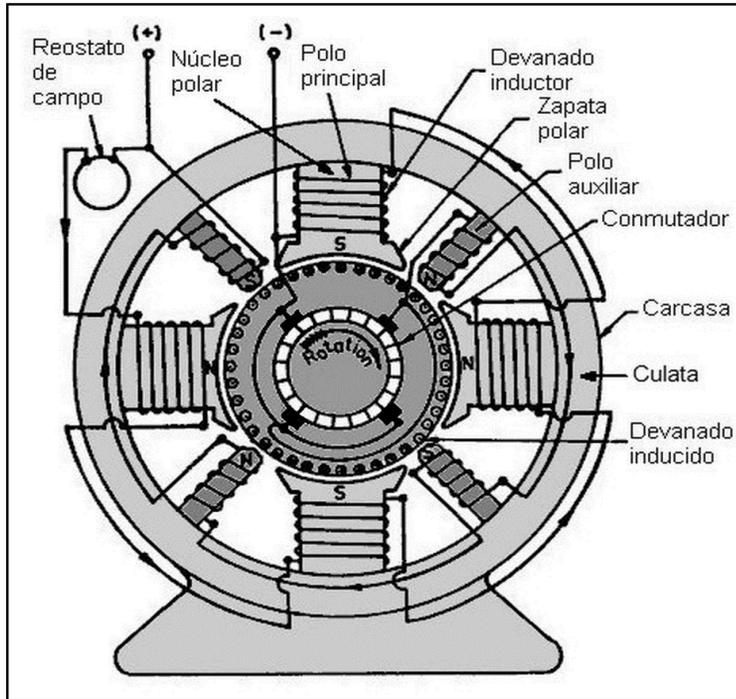
1.1.2 Constitución de las máquinas de corriente continua.

- En las máquinas de c.c. el inductor está en el estator, que es de polos salientes, y el inducido está en el rotor.
- Ambos devanados se conectan a tensiones continuas, pero el devanado inducido recibe su tensión a través de un colector de delgas, por lo que la corriente que circula por él es alterna (aunque no sinusoidal).
- En estas máquinas el núcleo magnético del rotor se construye apilando chapas magnéticas; pues al girar se ve sometido a un campo magnético variable y, en consecuencia, tiene pérdidas magnéticas. El circuito magnético del estator puede ser de hierro macizo, pues está sometido a un campo magnético constante por lo que carece de pérdidas magnéticas. Aun así, a veces los polos se construyen apilando chapas magnéticas.
- Cuando actúa como generador, en el inducido se generan corrientes alternas que son rectificadas por el colector de delgas, por lo que se suministra tensión continua al exterior.
- Cuando actúa como motor la interacción del campo magnético inductor con las corrientes alternas que circulan por el devanado del rotor produce el giro de éste.



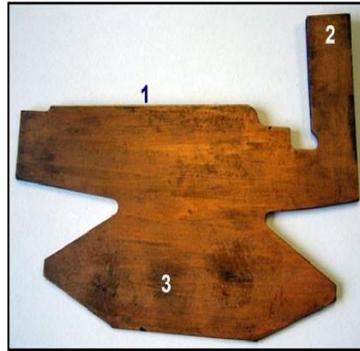
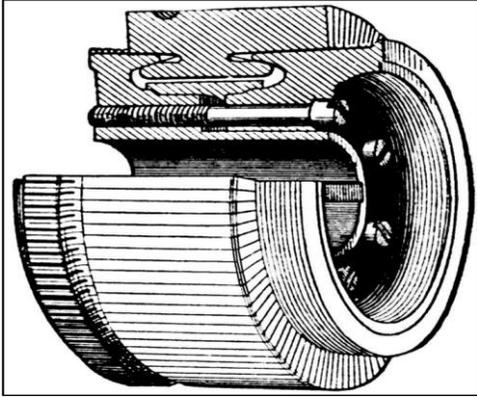
- El inductor es de polos salientes y está en el estator.
- El inducido está en el rotor y su devanado se aloja en ranuras.
- El inducido se alimenta a través de un colector de delgas que no aparece en la figura adjunta.
- Una línea neutra (L.N.) es una recta que une los puntos donde el campo magnético se anula.
- Hay tantas líneas neutras como pares de polos.
- Una línea neutra teórica es una L.N. cuando solo existe el campo magnético inductor y pasa justo por el centro de los espacios interpolares.

1.1.3. Descripción de la máquina de corriente Continua.



- La culata es la parte del estator que forma parte del circuito magnético y que soporta los polos.
- Rodeando a la culata está la carcasa de hierro de fundición y que es la envolvente de la máquina.
- Sobre la culata se fijan los polos principales o polos inductores donde se arrolla el devanado inductor, también denominado de excitación o de campo.
- Cada polo consta de un núcleo polar donde, se arrolla el bobinado del polo, y de una expansión denominada zapata polar.
- Los polos auxiliares o de conmutación tienen como función mejorar la conmutación en el colector de delgas y, a veces, también compensar la reacción de inducido. Se disponen entre los polos principales y se conectan en serie con el inducido.
- El rotor tiene un devanado cerrado y un colector de delgas que permite conectarlo a un circuito eléctrico exterior a través de unas escobillas situadas en el estator. Este devanado es el inducido.

Colector de Delgas.



Delga

1. Superficie de contacto con las escobillas
2. Cola de milano
3. Talón para contacto con las escobillas

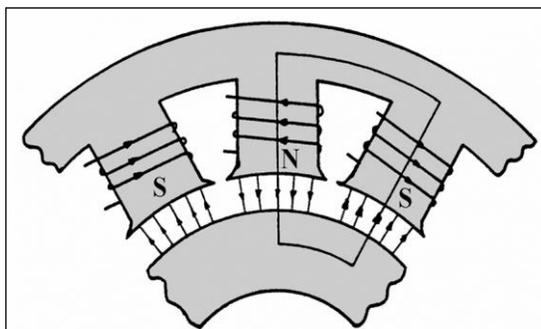
1.1.4. Devanados de la máquina de corriente continúa

MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA			
<i>Devanado</i>	<i>Situación</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Tipo</i>
Inductor	Estator	0 Hz (corriente continua)	Bobinas polares
Inducido	Rotor	$f = \frac{p \cdot n}{60}$ en bobinas $f = 0$ Hz en bornes	Bobinas en ranuras conectadas en sus extremos a un colector de delgas

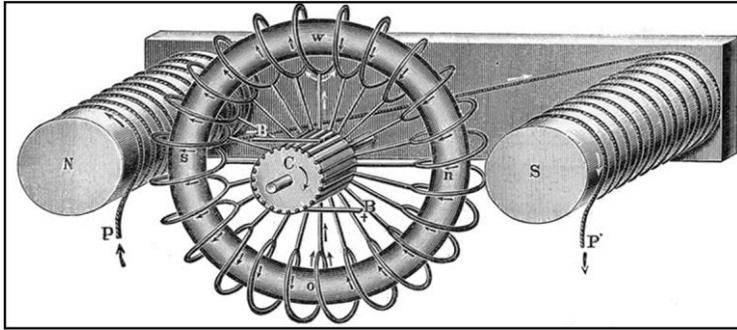
- El devanado **inducido** es un devanado cerrado que se conecta con el Exterior a través de un colector de delgas.
- Esto hace que quede dividido en un número par de **ramas en paralelo** Idénticas

$2a$ = Número de ramas en paralelo del inducido.

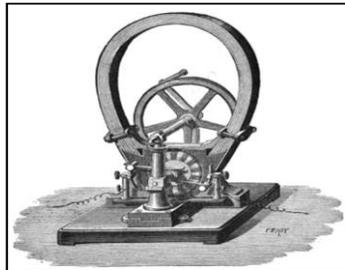
Devanado concentrado de inductor



Devanado de Anillo (Maquina de Grant)

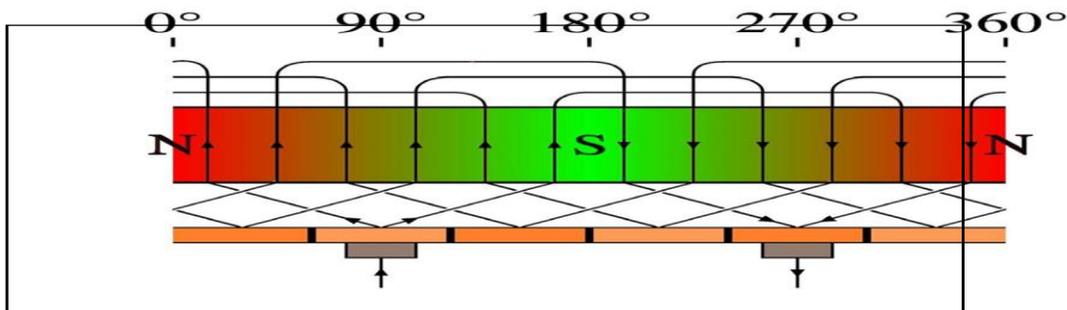


Fuente: Wikimedia Commons: "Bibliothek allgemeinen und praktischen Wissens für Militäranwärter Band III, 1905".



Fuente: Wikimedia Commons: "Electric lighting: A practical treatise".
Hippolyte Fontaine. 1878

Devanado de inducido de tambor



Fuente: Wikimedia CommonsAutor: Stündle

El devanado **inducido** es un devanado cerrado que se conecta con el exterior a través de un colector de delgas.

Puede ser *en anillo* (actualmente ya no se utiliza) o *de tambor*.

1.1.5. Máquinas de corriente continua de otros devanados.

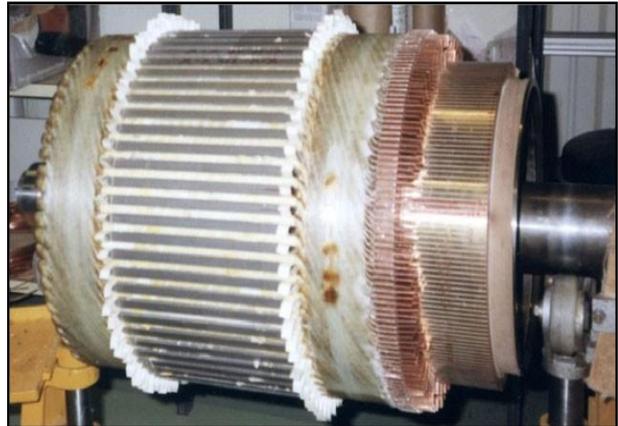
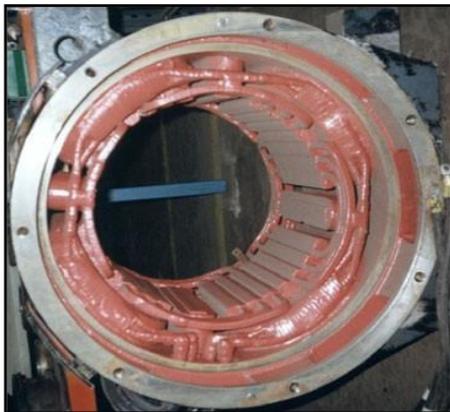
En algunas máquinas de c.c. el inductor es de imanes permanentes, por lo que carecen de devanado inductor.

Además de los devanados inductor e inducido, las máquinas de corriente continua pueden poseer otros devanados: de compensación y de conmutación, que se conectan en serie con el inducido.

El **devanado de compensación** se aloja en ranuras longitudinales practicadas en las zapatas polares (en el lado que mira al entrehierro). Su misión es anular la reacción de inducido; es decir, el campo magnético creado por la corriente que circula por el inducido.

El **devanado de conmutación** es el devanado de los polos auxiliares o de conmutación que se colocan en el estator a mitad de camino entre dos polos inductores. La misión de este devanado es mejorar la conmutación en el colector de delgas.

Si la máquina carece de devanado de compensación se aumenta el número de espiras del devanado de conmutación para que también sirva para compensar la reacción de inducido.



Estator y rotor de una máquina de corriente continua durante su proceso de fabricación.

Máquina de corriente continua.

- 1 Polo principal del inductor.
- 2 Polo auxiliar o de conmutación.
- 3 Colector de delgas.
4. Escobillas del rotor

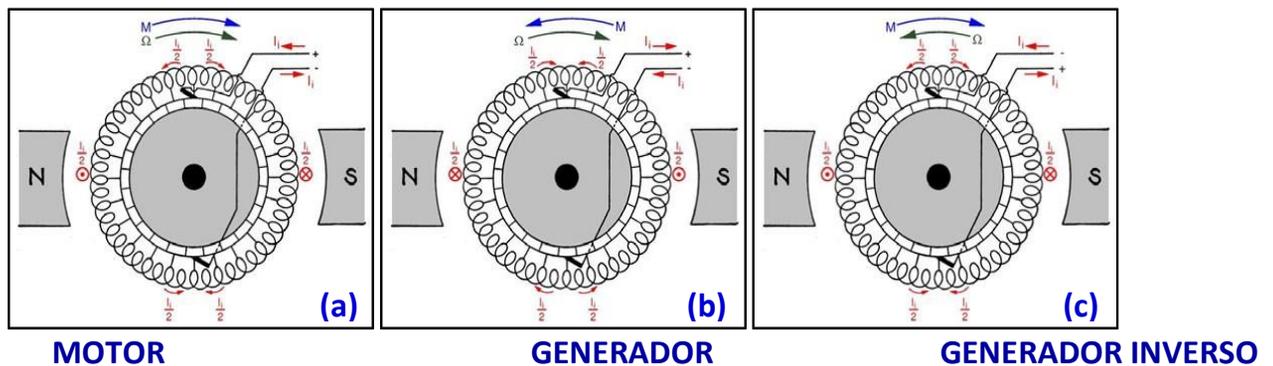


1.1.6. Principio de funcionamiento de un generador de corriente continua.

Cuando la máquina actúa como **generador** da lugar en el eje a un **par de frenado**; es decir, un par que actúa en sentido contrario a la velocidad de giro (luego consume energía mecánica que debe ser suministrada por un motor acoplado al eje de la máquina de corriente continua), y en bornes del inducido a una **fuerza electromotriz (f.e.m.)**, que provoca la circulación de la corriente que se suministra al circuito exterior conectado al inducido (luego, suministra energía eléctrica al exterior).

- La f.e.m. inducida en cada conductor del inducido cambia de sentido cuando pasa de estar situado frente a un polo inductor a estar frente a un polo de signo contrario.
- Para que al exterior se suministre corriente continua el colector de delgas conmuta las conexiones de cada conductor cuando se produce la inversión de sentido de su f.e.m. inducida.
- Por lo tanto, el colector de delgas actúa de rectificador mecánico de la tensión del inducido.

Motor y generador de c.c.



Si una máquina de c.c. pasa de actuar como motor (Fig. a) a funcionar como generador manteniendo el mismo sentido de giro (Fig. b), la polaridad en los bornes del inducido no varía, pero se invierten los sentidos de la corriente del inducido I_i y del par M .

Si una máquina de c.c. pasa de actuar como motor (Fig. a) a funcionar como generador cambiando el sentido de giro (Fig. c), se invierte la polaridad en los bornes del inducido, pero se mantienen los mismos sentidos de la corriente del inducido I_i y del par M .

1.1.7 Magnitudes básicas. F.e.m.

- Se denomina E a la fuerza electromotriz (f.e.m.) inducida en el devanado inducido de un motor de corriente continua y a la fuerza contra electromotriz (f.c.e.m.) en el inducido en un generador de c.c.
- Se cumple que

$$E = K_E n = K_M M$$

En las ecuaciones anteriores:

- n es la velocidad de la máquina medida en r.p.m.
 - Φ_M es el *flujo por polo*. Es el flujo que atraviesa a una espira diametral que estuviera colocada justo frente a un polo inductor.
Se mide en Wb (Weber).
 - K_E y K_M son constantes constructivas distintas para cada máquina.
- Las constantes constructivas K_E y K_M se calculan así:

$$K_E = \frac{1 p Z}{60 a} \qquad K_M = \frac{1 p Z}{2 \pi a}$$

En las ecuaciones anteriores:

- $2p$ es el número de polos de la máquina.
- $2a$ es el número de ramas en paralelo en que queda dividido el inducido por las escobillas.
- Z es el número de conductores del inducido.
 - Es evidente que se verifica la siguiente relación:

$$K_E = \frac{2\pi}{60} KM$$

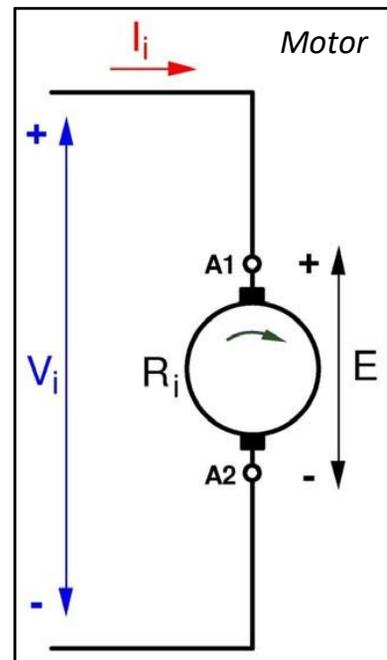
60

1.1.8 Ecuación eléctrica del inducido de un motor de c.c.

En un **motor** de c.c. se verifica que

$$V_i = E + R_i I_i + V_{esc}$$

- V_i es la tensión con que se alimenta al circuito del inducido.
- I_i es la corriente del inducido.
- R_i es la resistencia del circuito del inducido (incluye la resistencia del bobinado inducido y de los devanados conectados en serie con él, si los hay).
- V_{esc} es la caída de tensión en un par de escobillas (≈ 2 V).



1.1.9 Ecuación eléctrica del inducido de un generador de c.c.

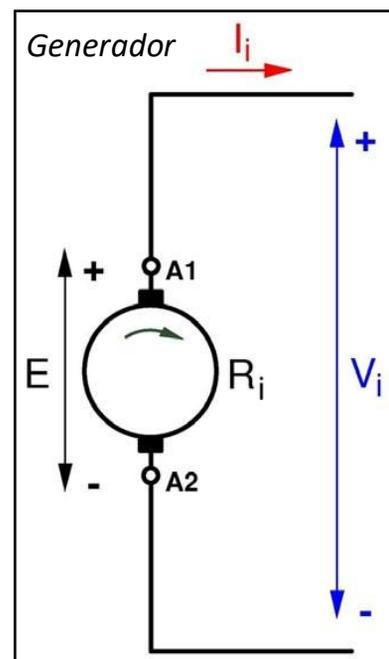
- En un **generador** de c.c. se verifica que

$$V_i = E - R_i I_i + V_{esc}$$

- En un **motor** E es una fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.) y se cumple
Que

E menor que V_i

- En un **generador** E es una fuerza electromotriz (f.e.m.) y se cumple que



E mayor que V_i .

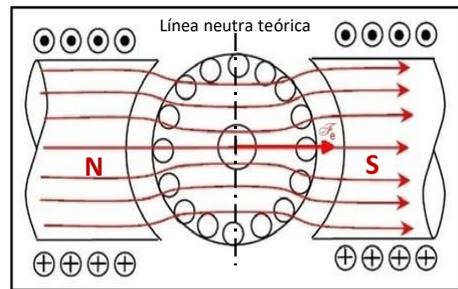
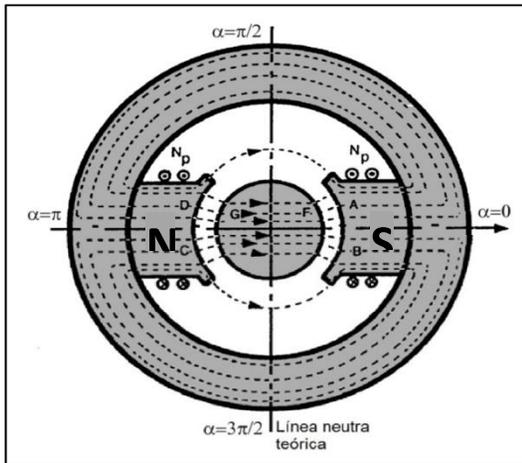
1.1.10 Magnitudes básicas. Par

- El par M que produce una máquina de c.c. se puede calcular así

$$M = K_M I_i \Phi_M$$

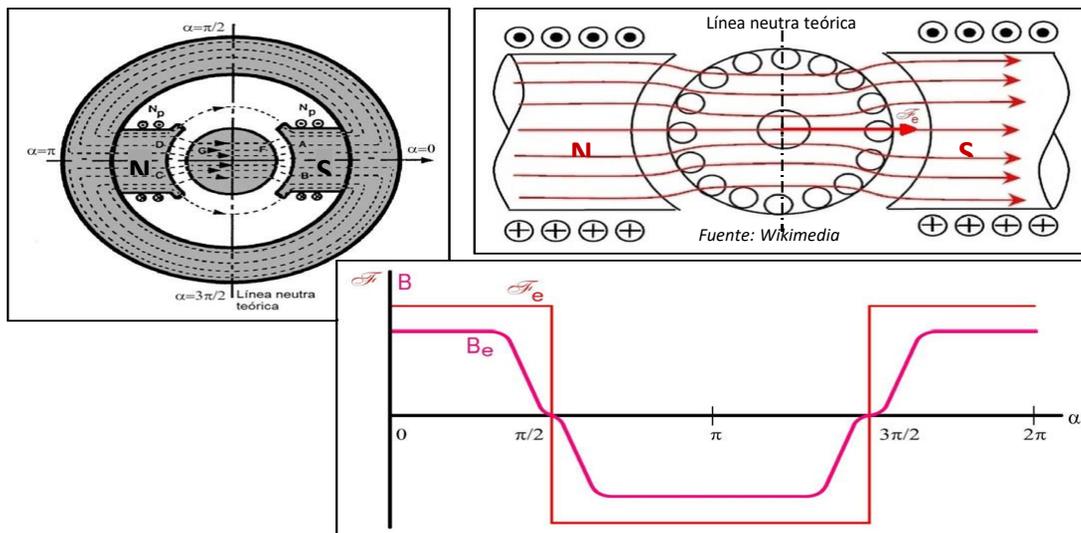
- De la ecuación anterior se deduce que si se mantiene el signo del flujo Φ_M , el par cambia de sentido cuando cambia de signo la corriente del inducido I_i . Esto es lo que sucede cuando una máquina pasa de funcionar como motor a funcionar como generador manteniendo el mismo sentido de giro.
- También se deduce que cuando se desea cambiar el sentido de giro de un motor de c.c. hay que cambiar de signo a la corriente del inducido o al campo magnético, pero no a ambos simultáneamente.
- Se puede deducir que el par también se puede obtener así:

INDUCTOR



Fuente: Wikimedia Commons. Autores: MattLanf y Hawkins

Campo magnético del inductor



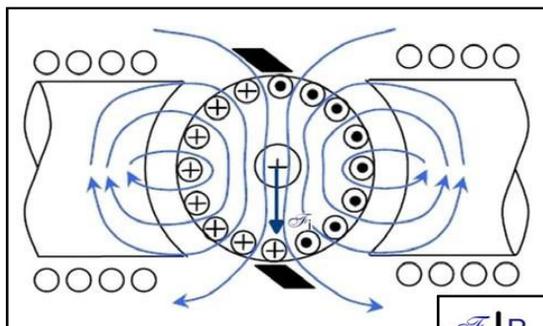
- En la diapositiva anterior se muestra una máquina de dos polos funcionando en vacío

(sin corriente en el inducido), por lo que el campo magnético es solamente el originado

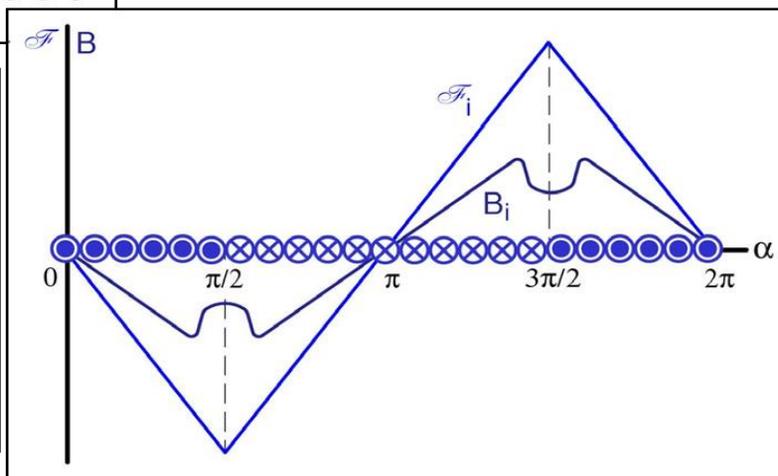
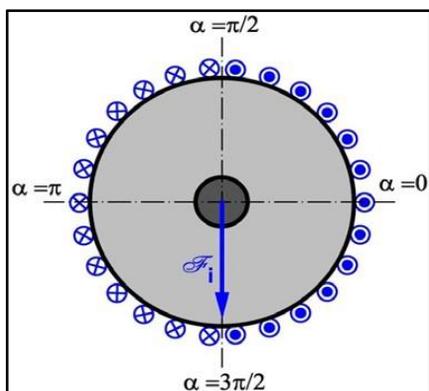
por el inductor.

- El origen de ángulos se ha elegido arbitrariamente en el centro del polo sur inductor.
- Al ser de dos polos, en esta máquina los ángulos eléctricos coinciden con los ángulos geométricos. Para dar mayor generalidad a los razonamientos y hacerlos válidos para máquinas de más polos, se va a trabajar con ángulos eléctricos.
- En la diapositiva se muestra la distribución a lo largo del entrehierro de la fuerza magnetomotriz (f.m.m.) F_e y de la inducción magnética B_e del inductor.
- La f.m.m. F_e tiene forma rectangular. La inducción B_e es constante en el entrehierro bajo cada polo y disminuye rápidamente entre los polos y se hace nula justo medio camino entre dos polos inductores sucesivos.
- Luego, en este caso la **línea neutra** coincide con su posición teórica y pasa por las posiciones angulares a $\pi/2$ y $3\pi/2$ radianes eléctricos.
- Hay tantas líneas neutras como pares de polos tiene la máquina.

1.1.11 Reacción de Inducido



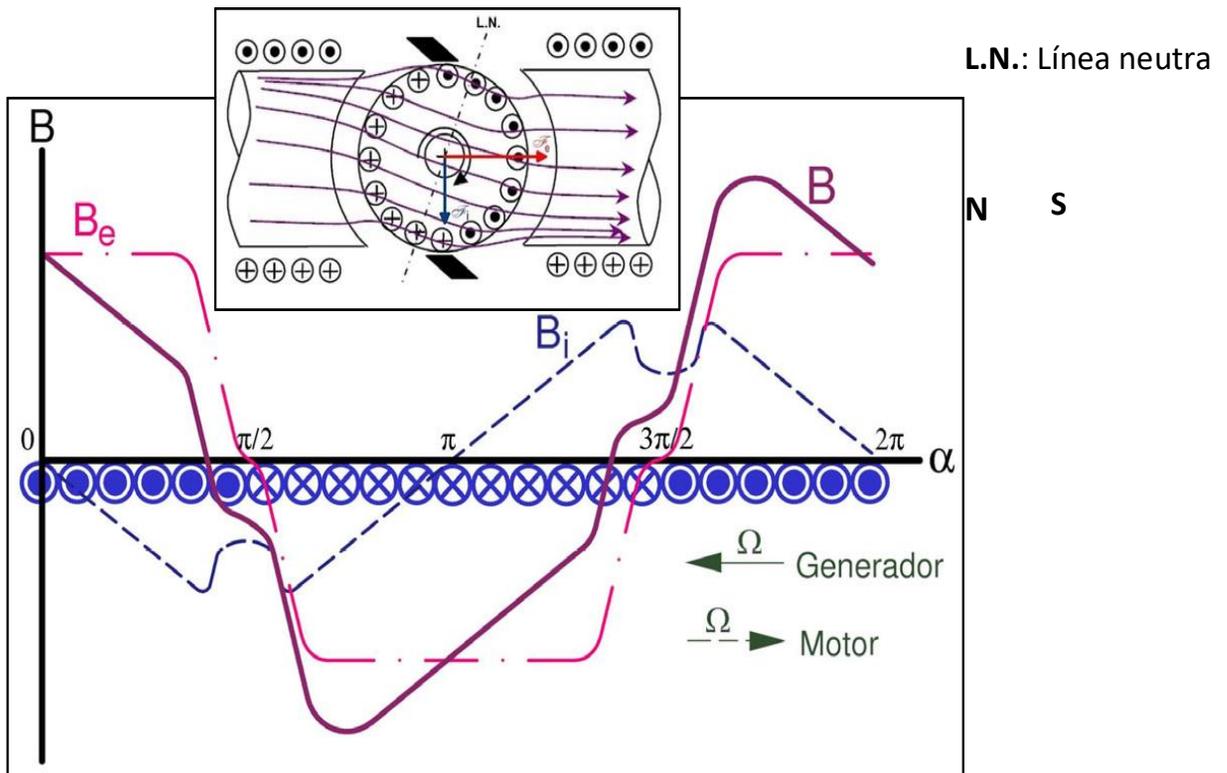
reacción de inducido de una máquina de corriente continua en carga cuando tiene sus escobillas sobre la línea neutra teórica.



Fuente: Wikimedia Commons. Autores: MattLanf y Hawkins

- En la diapositiva anterior se muestra el campo magnético originado por las corrientes del inducido cuando una máquina de c.c. está en carga.
- Se supone que las escobillas están situadas sobre la línea neutra teórica (L.N.T.). Esto es, la colocación de las escobillas sobre el colector de delgas es tal que se produce la conmutación de la corriente de una bobina justo cuando pasa por la posición donde se encuentra la L.N.T.
- La fuerza magnetomotriz (f.m.m.) F_i creada por las corrientes del inducido se denomina **reacción de inducido**.
- En este caso la f.m.m. del inducido es *transversal*. Tiene sus máximos a 90° eléctricos de los máximos del campo magnético inductor.
- La f.m.m. del inducido F_i varía linealmente, teniendo valor nulo en los ejes de cada polo inductor y los valores máximos en la L.N.T.
- La inducción magnética del inducido B_i tiene la misma forma que la f.m.m. en la zona de entrehierro uniforme bajo cada polo (varía linealmente) y presenta un fuerte decrecimiento en la zona interpolar debido al aumento del entrehierro en dicha zona.

1.1.12. Reacción de inducido: Inducción total



Fuente: Wikimedia Commons. Autores: MattLanf y Hawkins

Desfase de la línea neutra

- En la figura anterior se muestra la inducción total B que tiene una máquina de c.c. en carga debida a la acción conjunta de las f.m.m.s inductora e inducida.
- El caso mostrado en la figura grande de la diapositiva anterior corresponde a la máquina funcionando como generador y girando en sentido horario (ver la figura pequeña) o a la máquina actuando como motor y girando en sentido antihorario (ver la página 20).
- Se observa que ahora la inducción magnética se anula en unas posiciones distintas a las del campo magnético inductor.
- Por lo tanto, la línea neutra cambia de posición con respecto a la línea neutra teórica. Este desfase de la línea neutra no es constante, pues depende de la corriente del inducido, y es en el sentido del movimiento para generadores y en el sentido contrario a la velocidad en motores.
- Luego, en generadores la línea neutra se **adelanta** y en motores se **retrasa**.

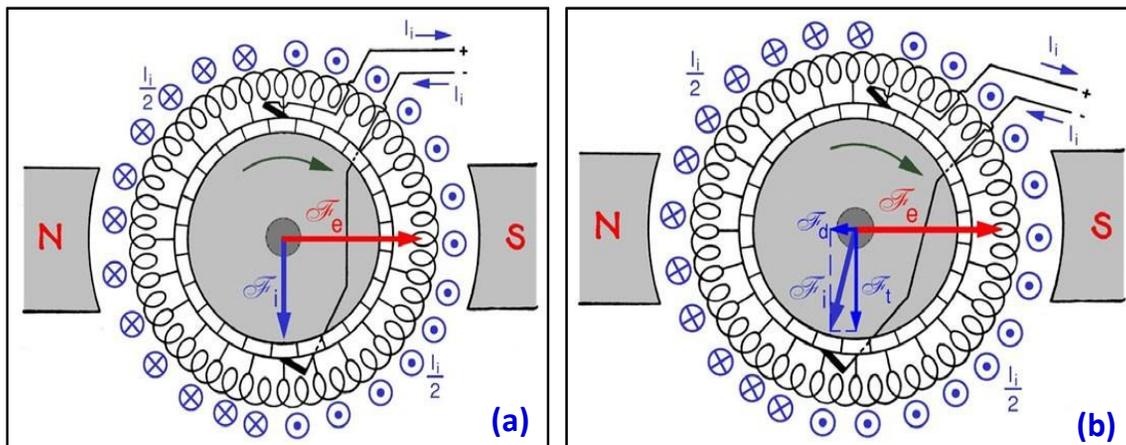
Efecto desmagnetizante.

- Recordemos que en el ejemplo que se está analizando los polos de la máquina ocupan las zonas que van de $3\pi/2$ a $\pi/2$ y de $\pi/2$ a $3\pi/2$ radianes eléctricos, respectivamente.
- En las diapositivas anteriores se puede comprobar que la f.m.m. del inducido F_i , en principio, parece tener un efecto nulo sobre el flujo de un polo Φ_M .
- En efecto, si la máquina funciona en la zona lineal (no hay saturación) la f.m.m. F_i refuerza el campo magnético una mitad de un polo en la misma proporción que la disminuye en la otra mitad del mismo polo y el flujo total de un polo Φ_M no varía.
 - Pero, dado que sí existe saturación en el circuito magnético de la máquina, sucede que el aumento del campo magnético en un medio polo debido a la f.m.m. F_i es menor que la disminución del campo en el otro medio polo. Por lo tanto, existe un **efecto desmagnetizante de la reacción de inducido** y el flujo por polo Φ_M disminuye cuando hay reacción de inducido.

Deformación del campo magnético.

- En la diapositiva anterior se ha mencionado que cuando hay reacción de inducido el campo magnético aumenta en unas zonas de los polos y disminuye en otras.
- Esta modificación de la forma de onda de la inducción magnética en el entrehierro hace que la fuerza electromotriz (f.e.m.) inducida sobre las espiras del inducido situadas bajo un polo no sea igual en todas ellas (a diferencia de lo que pasa cuando no hay reacción de inducido).
- Las espiras que están en la zona donde el campo magnético ha sido reforzado darán lugar a una f.e.m. mayor que cuando no hay reacción de inducido. Esto aumenta la tensión entre las delgas correspondientes a estas espiras, lo que dificulta la conmutación y puede producir chisporroteo en el colector.

Dirección de la reacción de inducido



Figuras modificadas de la obtenida en Wikimedia Commons. Origen: Hawkins Electrical Guide, Volume 5. Copyright 1917 by Theo. Audel & Co.

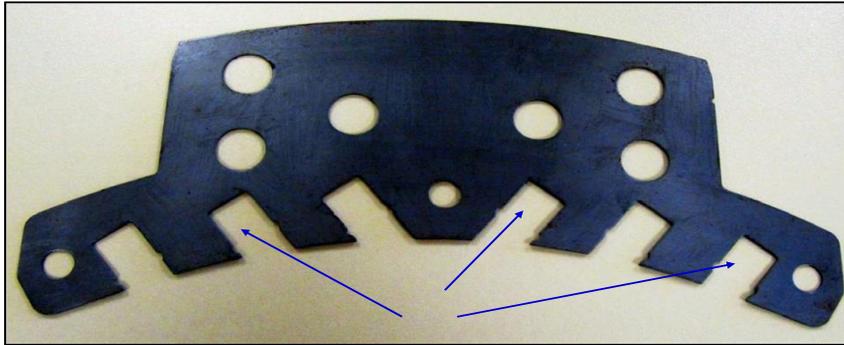
- Cuando las escobillas se colocan sobre la línea neutra teórica la reacción de inducido F_i es **transversal** (Fig. a).
- Cuando se desplazan las escobillas intentando colocarse en la nueva línea neutra, la reacción de inducido F_i cambia de orientación y ahora, además de la componente transversal F_t , tiene también una componente **longitudinal** F_d de sentido contrario a la f.m.m. del inductor F_e (Fig. b). Por lo tanto, en este caso aparece una f.m.m. $F_{\text{desmagnetizante}}$.

Corrección de la reacción de inducido

- La reacción de inducido produce efectos indeseables por lo que interesa eliminarla o reducir sus efectos lo más posible.
- En máquinas pequeñas se pueden **desplazar las escobillas** para situarlas en la nueva posición de la línea neutra cuando hay reacción de inducido. Se **adelantan** cuando la máquina es **generador** y se **retrasan** cuando es **motor**. Este sistema introduce una componente desmagnetizante a la reacción de inducido y exigiría cambiar la posición de las escobillas cuando varía la carga.
- El mejor sistema, que se utiliza en máquinas grandes y medianas con apreciables variaciones de carga, consiste en dejar las escobillas sobre la línea neutra teórica e introducir un **devanado de compensación** conectado en serie con el inducido. Este devanado se coloca en ranuras longitudinales practicadas en la zapata de los polos inductores y por él se hace pasar una corriente igual a la del inducido, pero de sentido contrario.
- En la mayor parte de las máquinas la reacción de inducido se corrige mediante los **polos auxiliares o de conmutación**. Como se verá más adelante, estos polos se usan, en principio, para mejorar la conmutación y su devanado (el **devanado de conmutación**) se conecta en serie con el inducido. Cuando estos polos se usan también para mejorar la reacción de inducido habrá que dotar de un mayor número de espiras a su devanado.
- El devanado de compensación corrige la deformación del campo magnético y el desplazamiento de la línea neutra. El de conmutación corrige el desplazamiento de la línea neutra, pero no la deformación del campo magnético debida a la reacción de inducido.

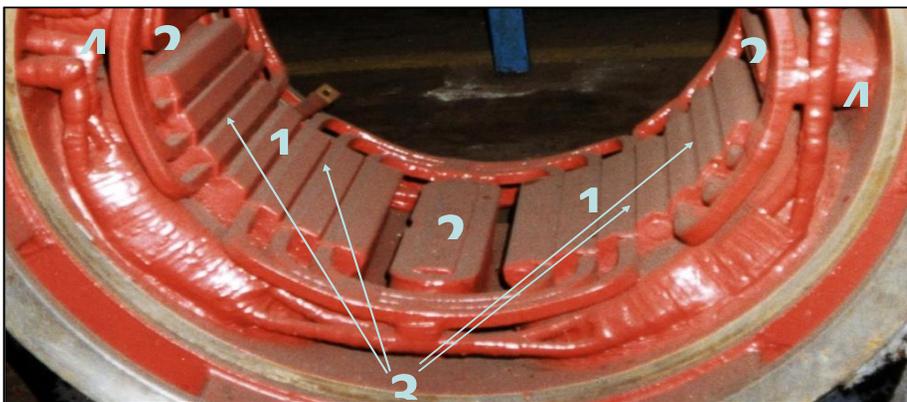
1.2 Bobinados de las máquinas de corriente continua

1.2.1 Devanado de compensación



- Chapa magnética para formar un polo inductor de una máquina de c.c. En la parte inferior de la zapata se aprecian las ranuras **1** para alojar el *devanado de compensación*.
- Aunque el inductor puede fabricarse de hierro macizo, los polos a veces se construyen apilando chapas para minimizar las pequeñas pérdidas magnéticas cuando hay cambios de la corriente de excitación o cuando el inductor se alimenta con una corriente rectificadora que tiene rizado.

1.2.3 Devanados auxiliares



1: Polo inductor.

2: Polo de conmutación.

3: Devanado de compensación.

4: Devanado de conmutación

Tanto el devanado de compensación como el de conmutación se conectan en serie con el inducido

1.2.4 Conmutación Ideal Hipotesis

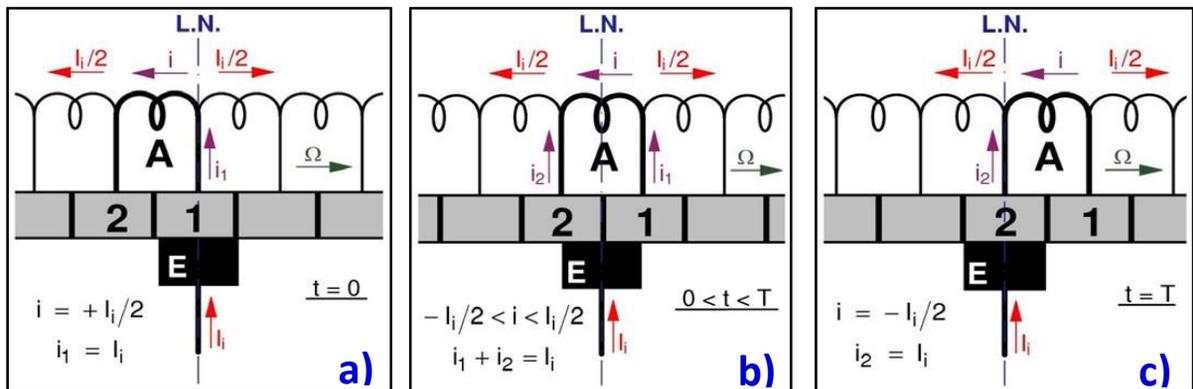
- No se inducen f.e.m.s sobre la bobina que conmuta.
- Se desprecian las resistencias de las bobinas y de los conductores.

Solo existe la resistencia de contacto entre delga y escobilla.

- La escobilla está situada sobre la línea neutra.
- La máquina gira a una velocidad Ω constante.
- El ancho de una escobilla es igual al de una delga (aunque en la práctica normalmente una escobilla es más ancha y contacta con varias delgas simultáneamente).
- Solo hay dos escobillas (no hay escobillas en paralelo). Luego, la corriente que circula por una escobilla es la corriente total del inducido I_j .

R_e = Resistencia de contacto delga-escobilla cuando la escobilla cubre totalmente a la delga.

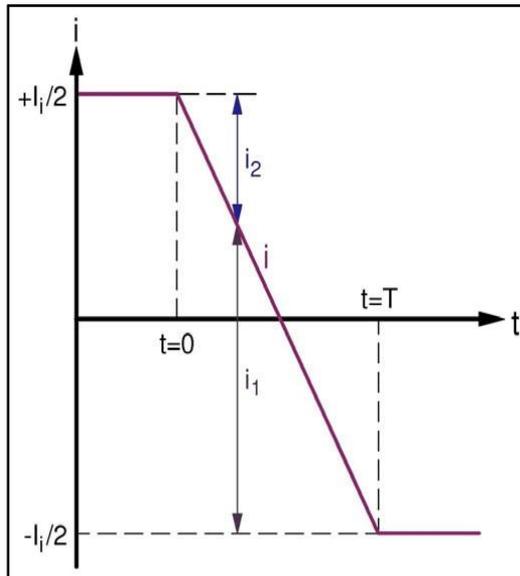
R_1 = Resistencia de contacto de la delga 1 con la escobilla E. R_2 = Resistencia de contacto de la delga 2 con la escobilla E.



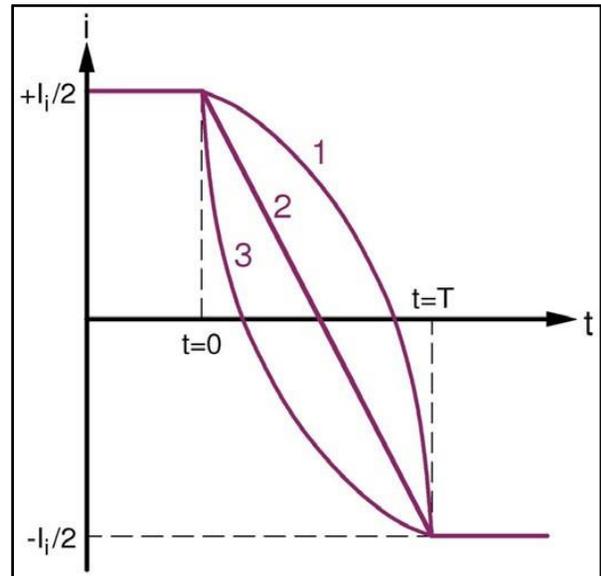
L.N. = Línea neutra; T = Período de conmutación;

A = Bobina del devanado inducido en anillo; E = Escobilla; 1, 2: Delgas

Commutación



Commutación lineal



Efectos de la f.e.m. reactiva:

- 1: Conmutación retrasada.
- 2: Conmutación lineal.
- 3: Conmutación adelantada.

1.2.5 Polos Auxiliares de conmutación

GENERADOR: Polo auxiliar del mismo signo que el polo principal (inductor) que le sigue según el movimiento del rotor.

MOTOR: Polo auxiliar del mismo signo que el polo principal que le precede al movimiento del rotor.

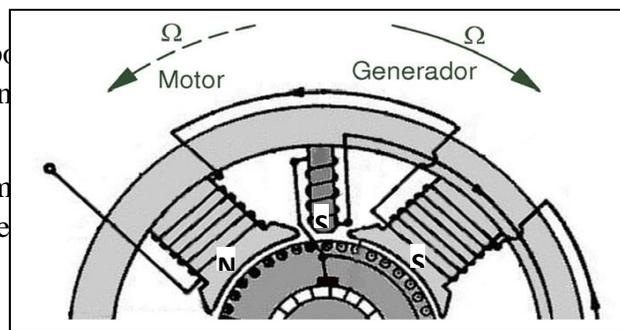


Fig. modificada de la publicada en Wikimedia Commons; Autor: Edinoruqi

Si no hay devanado de compensación los polos auxiliares tienen la doble misión de reducir la reacción de inducido y de mejorar la conmutación. Interesa que su acción varíe linealmente con la f.m.m. F_i por lo que, para reducir el efecto de la saturación, estos polos tienen un entrehierro mayor que los polos inductores. En máquinas pequeñas se desplaza la línea de escobillas con respecto a la línea neutra en lugar de usar polos auxiliares.

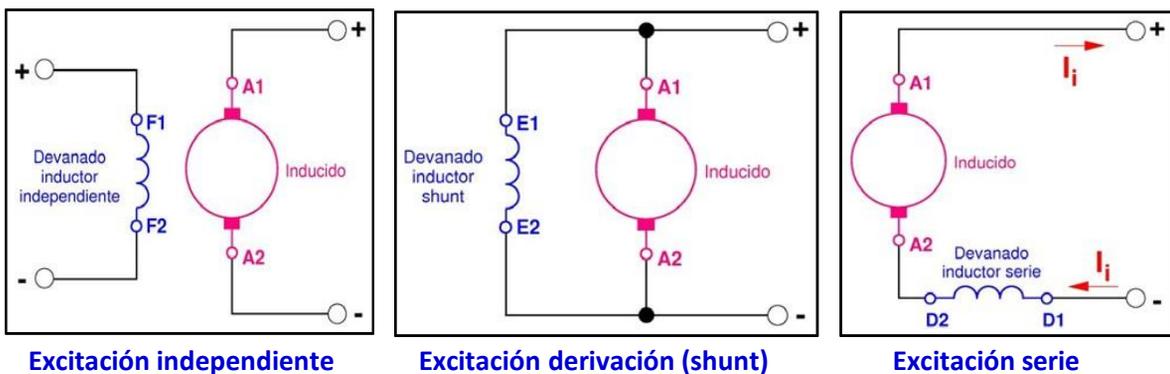
Capítulo II

Aplicación y selección de las máquinas de corriente continua.

Resultado de Aprendizaje: Entiende el principio de funcionamiento de las máquinas eléctricas de corriente continua, experimenta con las diferentes conexiones y configuraciones aplicándolos a diferentes entornos que pudiera presentarse en el ámbito práctico.

Analiza desde el punto de vista técnico las diferencias entre valores medidos en el laboratorio y los obtenidos en la teoría y se obtiene conclusiones al respecto.

2.1 Tipos de generadores de corriente continua

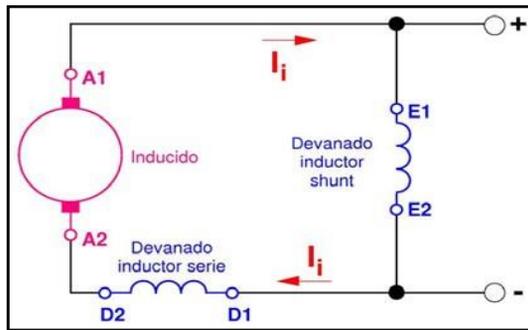


Los circuitos inductor e inducido de una máquina de c.c. se pueden conectar entre sí de diferentes maneras, dando lugar a máquinas de comportamientos diferentes.

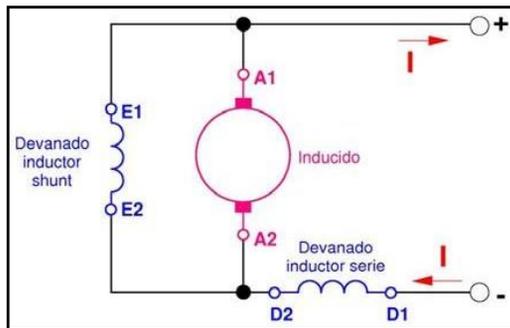
Existen estas formas de conexión:

- **Excitación independiente:** Los circuitos inductor e inducido se conectan a redes de corriente continua distintas.
- **Excitación derivación o shunt:** Los circuitos inductor e inducido se conectan en paralelo a una única red de corriente continua.
- **Excitación serie:** Los circuitos inductor e inducido se conectan en serie entre sí y el conjunto se conecta a una única red de corriente continua. Esta conexión en la práctica no se utiliza para generadores.
- **Excitación compuesta o compound:** Cada polo inductor tiene dos bobinas de forma que existen dos circuitos inductores. Uno se conecta en serie y el otro en paralelo con el circuito inducido y el conjunto se conecta a una única red de corriente continua.

Máquinas **Compound**



Excitación compuesta (compound) corta derivación



Excitación compuesta (Compound) larga derivación.

Dependiendo de cómo se realicen las conexiones serie y paralelo de los inductores de una máquina Compound se tienen estas dos variantes:

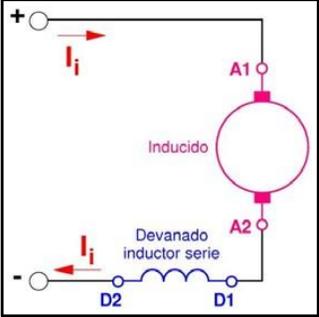
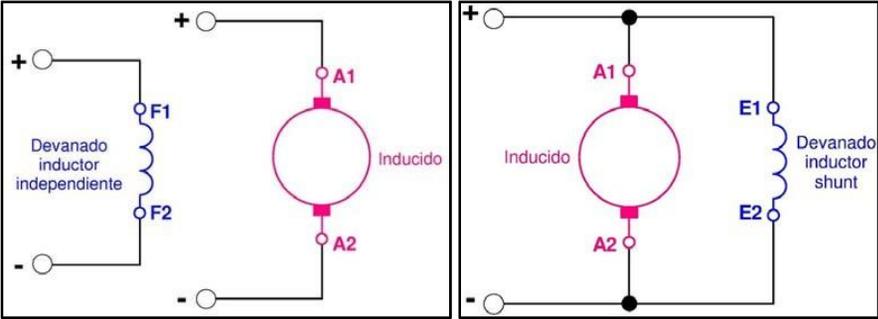
- **Corta derivación:** El inductor shunt se conecta directamente en paralelo con las escobillas del inducido y el conjunto de ambos se conecta en serie con el inductor serie.
- **Larga derivación:** El inductor shunt se conecta en paralelo al conjunto del inducido más el inductor serie.

Dependiendo de los sentidos de las f.m.m.s de los bobinados inductores se tienen estos dos tipos de máquinas Compound:

- **Compound aditiva:** Ambos bobinados inductores dan lugar a campos magnéticos del mismo sentido y la excitación total es la suma de las de ambos. Este es el tipo más habitual de máquina compuesta y es la que se ha representado en las diapositivas de este texto.
- **Compound diferencial:** Los bobinados inductores dan lugar a campos magnéticos de sentidos opuestos y la excitación total es la diferencia de las de ambos.

Todas estas conexiones corresponden a la máquina girando en sentido horario. Para giro anti horario hay que invertir las conexiones a los bornes A1 y A2.

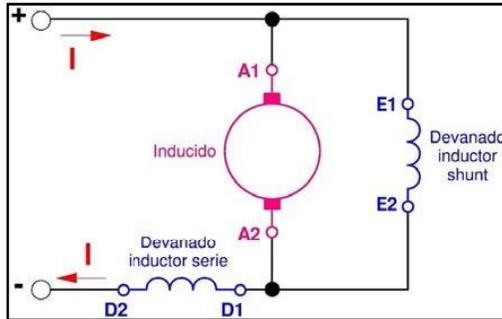
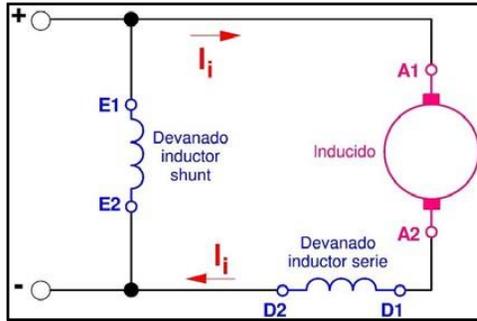
2.2. Tipos de motores de corriente continua



Excitación independiente

Excitación derivación (shunt)

Excitación serie



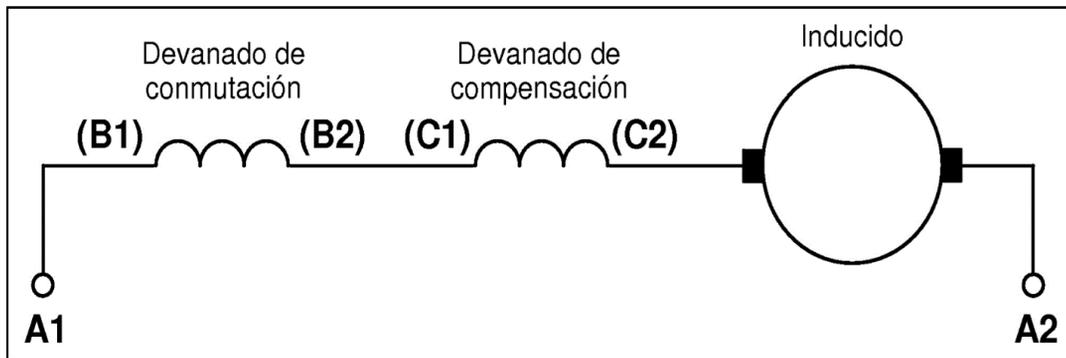
Excitación compuesta (compound) compuesta (compound) Larga derivación derivación

Excitación Corta

Designación de bornes normalizada

	NORMATIVA ACTUAL (UNE-EN 60034-8)		NORMATIVA ANTERIOR	
	Principio	Finales	Principio	Finales
Devanado Inducido	(A1)	(A2)	A	B
Inducido + devanados auxiliares	A1	A2	-	-
Polos auxiliares	B1	B2	G	H
Compensación	C1	C2		
Excitación serie	D1	D2	E	F
Excitación shunt	E1	E2	C	D
Excitación independiente	F1	F2	J	K

Bornes del circuito de inducido



Inducido más bobinados auxiliares conectados en serie

- Los circuitos auxiliares (de compensación y de conmutación) se conectan en serie con el inducido de forma permanente y, por lo tanto, forman parte del circuito inducido a pesar de estar situados en el estator.
- En las figuras de todas las diapositivas de este documento cuando se dibuja el inducido no se representa solo al inducido propiamente dicho, sino que se incluye también a los devanados auxiliares, si los hay.

2.3 Relaciones fundamentales y características de funcionamiento

2.3.1. Generadores de corriente continua.

Un generador de corriente continua gira movido por un motor (turbina, motor de explosión, etc.), de tal manera que recibe la energía mecánica que le suministra el motor para producir energía eléctrica en su inducido.

La ecuación eléctrica de su devanado inducido (en el rotor)

$$E = V_{i+} R_j I_{j+} + V_{esc} = V_i + R_i I_i$$

V_i : tensión de alimentación del circuito inducido (de resistencia R_j). I_j : corriente del devanado inducido.

V_e : tensión de alimentación del circuito inductor (de resistencia R_e).

I_e : corriente del devanado inductor o de excitación.

R_e : resistencia total del circuito inductor, formado por: devanado inductor + reóstato de excitación o de regulación del campo (si lo hay).

R_j : resistencia total del circuito del inducido, el cual está formado por: devanado inducido + devanados auxiliares + devanado de excitación serie (si lo hay) + reóstato (si lo hay, aunque no es habitual colocar

reóstatos en el inducido de los generadores).

E: fuerza electromotriz (f.e.m) inducida en el devanado inducido.

V_{esc} : caída de tensión en un par de escobillas

$$(V_{esc} = 2V \text{ si } I_i \neq 0)$$

2.3.2 Potencias de entrada y salida

Generador de corriente continua autoexcitado, es aquel que no es de excitación independiente (conexiones shunt, serie y Compound). Por lo tanto, en estos generadores la alimentación del inductor la proporciona el inducido de la propia máquina.

P_1 y P_2 son, respectivamente, las potencias de *entrada* (total absorbida) y de *salida* (o útil suministrada) de la máquina. En un generador P_1 es la potencia mecánica que entra a la máquina y P_2 es la potencia eléctrica suministrada por el generador:

$$P_1 = V I$$

$$P_2 = V I$$

V: tensión en bornes del generador.

I: corriente de carga = corriente suministrada por el generador

2.3.3. Generadores de CC de otras potencias.

Las *pérdidas en el hierro* P_{Fe} solo se producen en el rotor, ya que el giro hace que su núcleo magnético se vea sometido a un campo magnético variable. En régimen permanente el estator está sometido a un campo magnético constante y no tiene pérdidas en el hierro.

- *Pérdidas en las escobillas:* $P_{esc} = V_{esc} I_i$

- *Pérdidas del cobre del inducido:* P_{Cui}

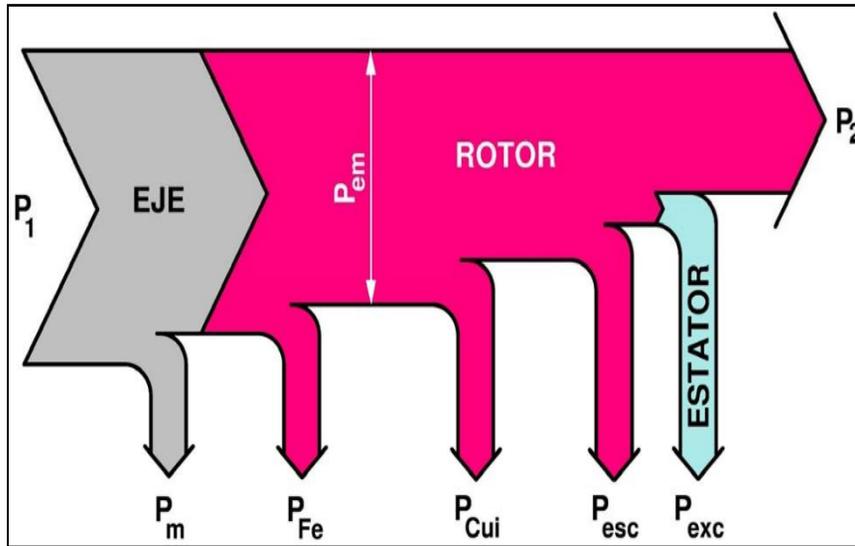
$$= R_i I^2$$

- *Pérdidas en el induc tor:* $P_{exc} = V_e I_e = R_e I^2$

- *Potencia electromagnética o potencia interna del generador (potencia que se transforma de mecánica en eléctrica):* P_e

(P_{em} también se denomina P_a)

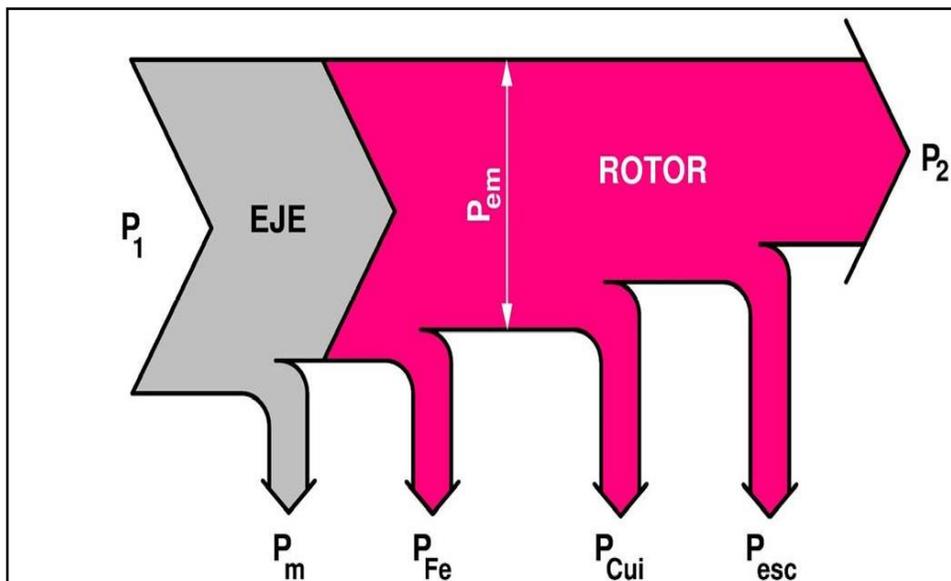
Balance de potencia de un generador autoexcitado.



$$P_{em} = P_2 \quad \square \quad P_{exc} \quad \square \quad P_{esc} \quad \square \quad P_{Cui}$$

$$P_1 = P_m \quad \square \quad P_{Fe} \quad \square \quad P_{em}$$

Balance de potencia de un generador con excitación independiente



$$P_{em} = P_2 + P_{exc} + P_{Cui} \quad P_1 = P_m + P_{Fe} + P_{em}$$

(Ahora las pérdidas en la excitación P_{EXC} se producen a expensas de la potencia suministrada por la red eléctrica independiente del inductor).

2.3.4 Generadores de C.C.: Curvas características de servicio

(1)

- **Característica de vacío: $E = f(I_e)$**

Se conecta el inductor a una red eléctrica independiente y se deja la máquina en vacío ($I_i = 0$; $V_i = E$). Manteniendo la velocidad n constante, se varía la corriente inductora I_e y se obtiene la curva $E = f(I_e)$ suprimiendo el efecto de la histéresis.

- **Característica en carga: $V = f(I_e)$**

Muestra la relación entre la tensión V de salida y la corriente de excitación I_e cuando la corriente I en la carga y la velocidad n se mantienen constantes. No se tiene en cuenta la histéresis magnética. (En el caso particular de $I = 0$ se convierte en la curva de vacío).

- **Característica externa o exterior: $V = f(I)$**

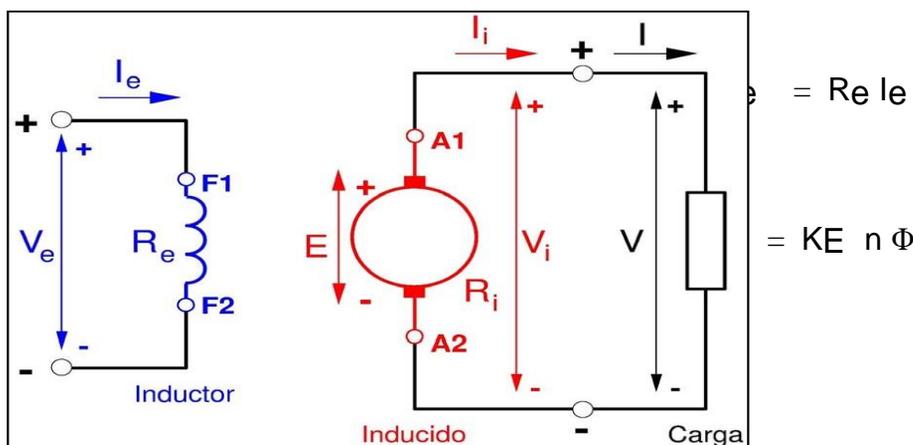
Se conecta al generador una resistencia de carga R_C cuyo valor óhmico se va variando. La curva muestra la relación entre la tensión en bornes V y la corriente de carga I manteniendo constante la velocidad n . Si la excitación es independiente, I_e también es constante.

- **Característica de regulación: $I_e = f(I)$**

Muestra cómo debe variarse la corriente de excitación I_e en función de la corriente de la carga I para conseguir mantener constante la tensión de salida V .

La velocidad n es constante y no se tiene en cuenta la histéresis magnética. (La velocidad se denomina n en r.p.m. y Ω en rad/s).

2.3.5. Generador con excitación independiente.



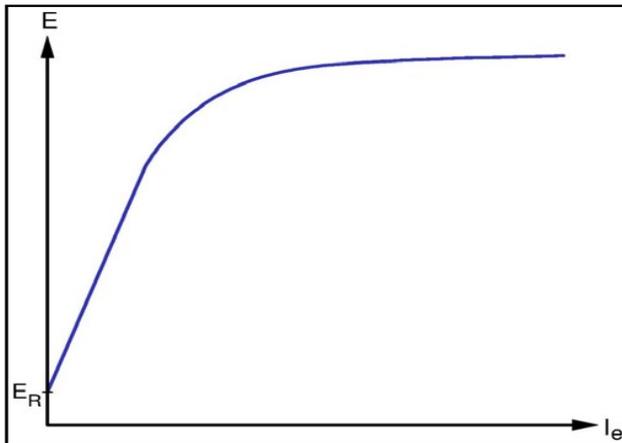
e
l
Φ
p
e
r
m
a
n
e
c
c
o
n
s
t
a
n
t
e
:

$$\frac{E}{E'} = \frac{1}{n'}$$

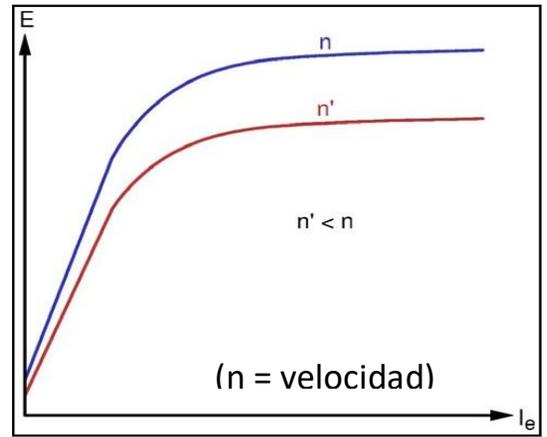
$$V_i = V - \sum_j R_j I_j$$

V_{esc}

Curva de un generador con excitación independiente.

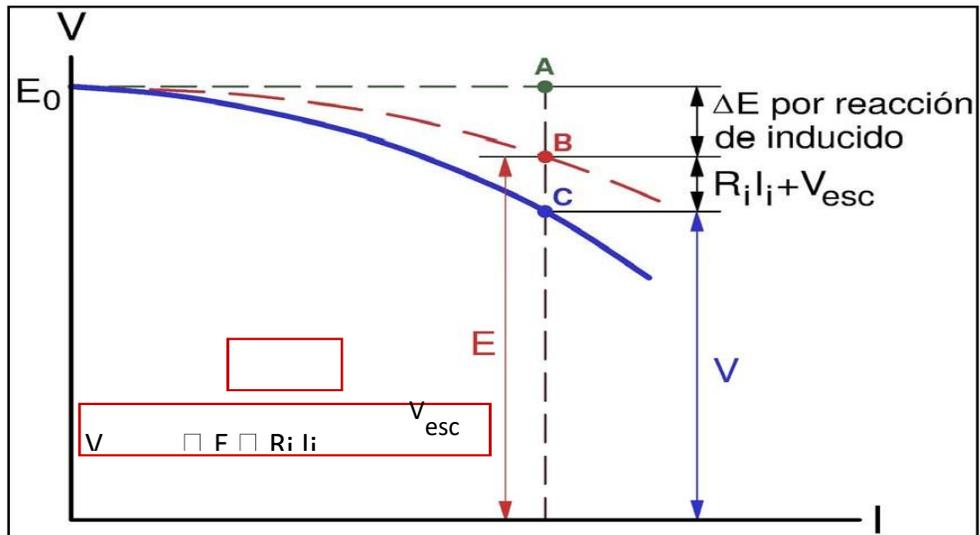


vacío de



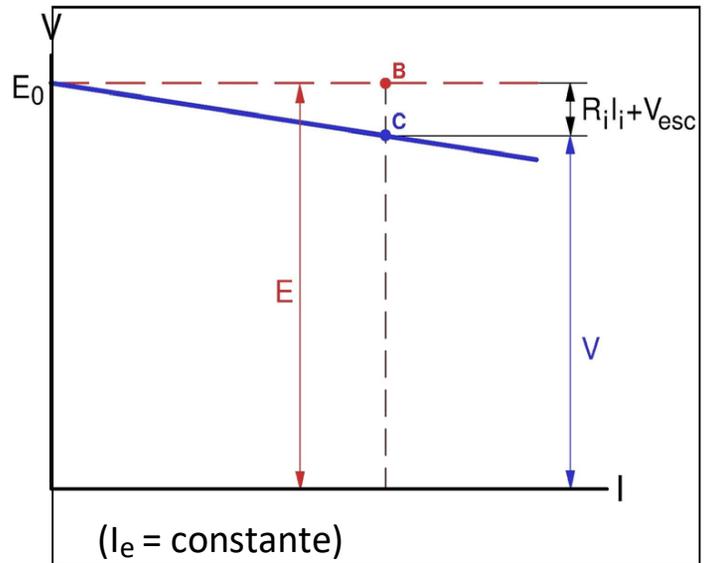
- Se ensaya la máquina dos veces: una con I_e aumentando y otra con I_e disminuyendo y se utiliza la curva media entre las dos obtenidas para eliminar la histéresis.
- Aparece una f.e.m. E_R para $I_e = 0$ debida al magnetismo remanente.
- Sin histéresis, para una I_e dada hay siempre el mismo flujo $\Phi \Rightarrow$ la f.e.m. E para dicha I_e es proporcional a n (ver la figura de la derecha).

Curva externa de un generador con excitación independiente



- La reacción de inducido produce un efecto desmagnetizante que disminuye el campo magnético tanto más cuanto mayor es la corriente del inducido I_i . Esto provoca una disminución de la f.e.m. que aumenta con I_i (y, por lo tanto, con la corriente I).

Curva externa de un generador con excitación independiente sin reacción de inducido



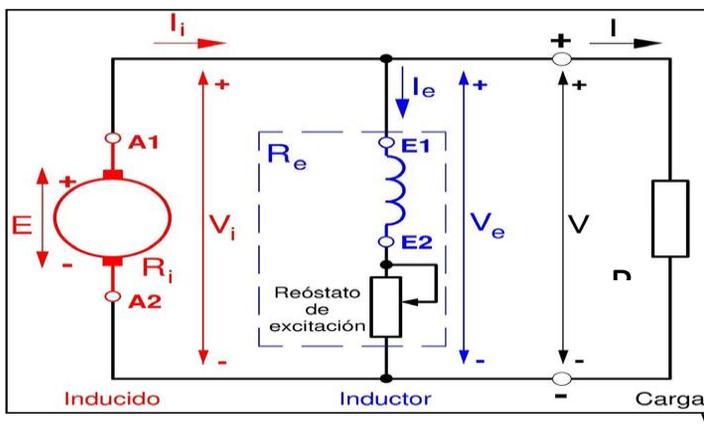
$$I_j \approx I$$

$$V \approx E - R_i I_j - V_{esc}$$

$$E \approx E_0$$

Si los devanados auxiliares eliminan la reacción de inducido, evidentemente se anula la disminución en la f.e.m. E provocada por el efecto desmagnetizante de la reacción de inducido. Entonces E se mantiene constante e igual a la f.e.m. en vacío E_0 .

2.3. 6 Generador Shunt o en derivación



$$V_i \approx V_e$$

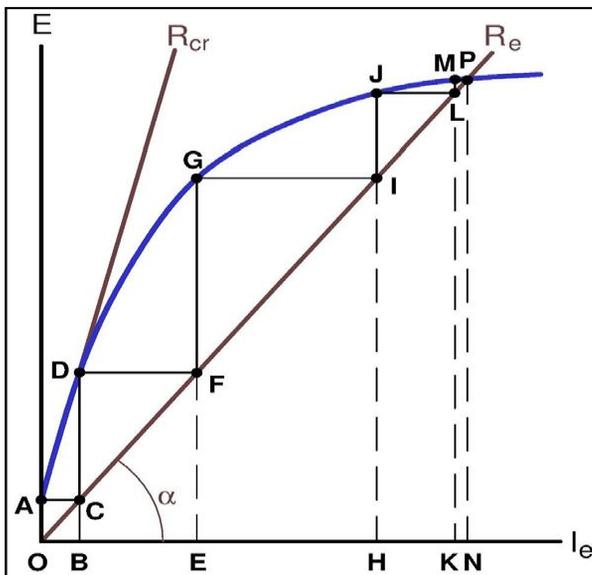
$$I_j \approx I$$

$$V = E - R_e I_e$$

$$V = E - R_i I_j$$

R_e elevada para que I_e pequeño: devanado inductor con muchas espiras de pequeña sección. R_e incluye también al reóstato de excitación.

Autoexcitación de un generador Shunt.



R_{cr} = Resistencia crítica

Si R_e es superior a la resistencia crítica, no se produce la autoexcitación.

$$R_e = \tan \alpha$$

OA: F.e.m. remanente E_R

ON: Corriente inductora final I_e

NP: F.e.m. final E

$$E = R_e \cdot I_e$$

R_e elevada para que I_e pequeño: devanado inductor con muchas espiras de pequeña sección. R_e incluye también al reóstato de

excitación.

Proceso de autoexcitación

- Al arrancar un generador shunt el inducido todavía no genera f.e.m., por lo que la corriente I_e es nula. En principio, parece que sin I_e no hay flujo magnético Φ ni f.e.m. E y la máquina no puede empezar a funcionar.
- Sin embargo, si la máquina posee un flujo remanente aparece un proceso acumulativo de **autoexcitación**:
- La máquina se arranca en vacío y el inducido solo alimenta al devanado inductor, cuya corriente I_e va a ser pequeña:

$$I_i = I_e$$

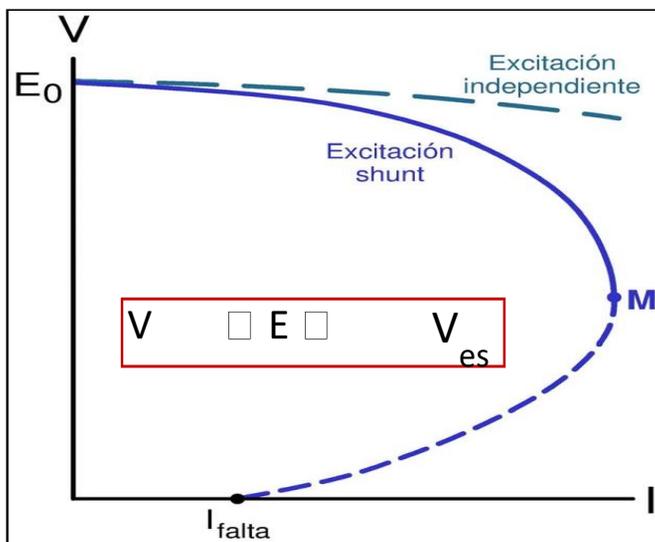
$$V = V_e$$

$$E = R_e I_e$$

- La relación anterior es una recta de pendiente α (recta **OP**).
- La f.e.m. remanente E_R **OA** hace que por el inductor pase una corriente I_e **OB**, lo que aumenta la f.e.m. E a **BD**. Esto aumenta I_e a **OE**, lo que sube la f.e.m. E a **EG**. Y así sucesivamente, hasta llegar al punto **P**.
- Una vez auto excitado, se pueden conectar cargas al generador.

$$V = V_e$$

Curva externa de un generador Shunt.



- En un generador de excitación independiente la tensión V_e y, consecuentemente, la corriente de excitación I_e son constantes y se obtiene una característica en la que la tensión V disminuye con la corriente de carga I .
- En un generador shunt el devanado inductor se alimenta con la misma tensión V que el inducido y que la carga. Si esta tensión V disminuye la corriente de excitación I_e también se reduce.
- En consecuencia, la característica exterior de un generador shunt o derivación queda por debajo de la del generador de excitación independiente, ya que hay que incluir una disminución adicional de la f.e.m. E debida a que la corriente de excitación I_e ya no es constante.
- Para obtener esta curva la resistencia de carga R_C se varía de ∞ a 0.
- Al principio R_C es grande, I_j es pequeña y V disminuye poco, lo que hace que I_e sea alta y la máquina esté saturada; entonces la f.e.m. E

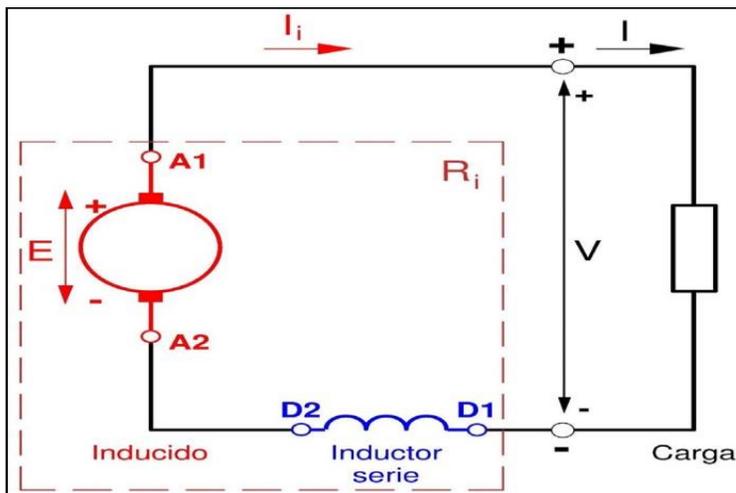
apenas
corriente

varía y la
de carga I

aumenta al disminuir R_C ($I = V/R_C$).

- Pero a partir del punto **M**, la corriente I_e empieza a ser pequeña por lo que la máquina ya no está saturada y al reducir R_C se producen disminuciones de la corriente I_e y de la f.e.m. E que hacen que se reduzca más la tensión V que la resistencia R_C ; luego la corriente I ahora se reduce al disminuir la resistencia de carga R_C ($I = V/R_C$).
- Cuando la resistencia de carga R_C se anula la máquina está en cortocircuito y circula una corriente I_{falta} que, en principio, no es peligrosa ya que, incluso, puede ser inferior a la intensidad asignada.
- No obstante, si el cortocircuito se produce de forma brusca hay un proceso transitorio donde sí pueden aparecer corrientes elevadas.
- En la zona de la curva externa por debajo del punto **M** la tensión V aumenta con la corriente I . Esto corresponde a un generador con funcionamiento *inestable*. La zona por encima del punto **M** es *estable*.

2.3.7 Generador Serie



I_i

(*) I_e

V_{esc}

(*) Si hay un reóstato en paralelo con el inductor:

$$I_e = \alpha \cdot I$$

$$(\alpha \leq 1)$$

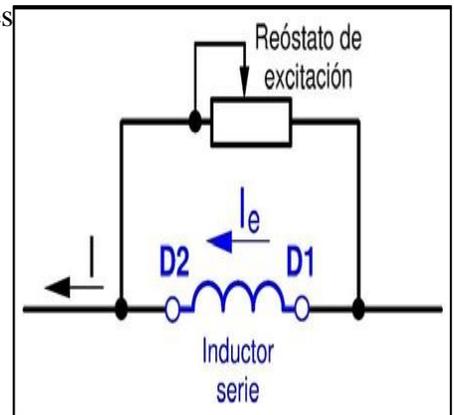
- **R_i** es la resistencia total del circuito inducido. Incluye las resistencias del devanado inducido, de los devanados auxiliares, del devanado inductor serie y del reóstato en serie

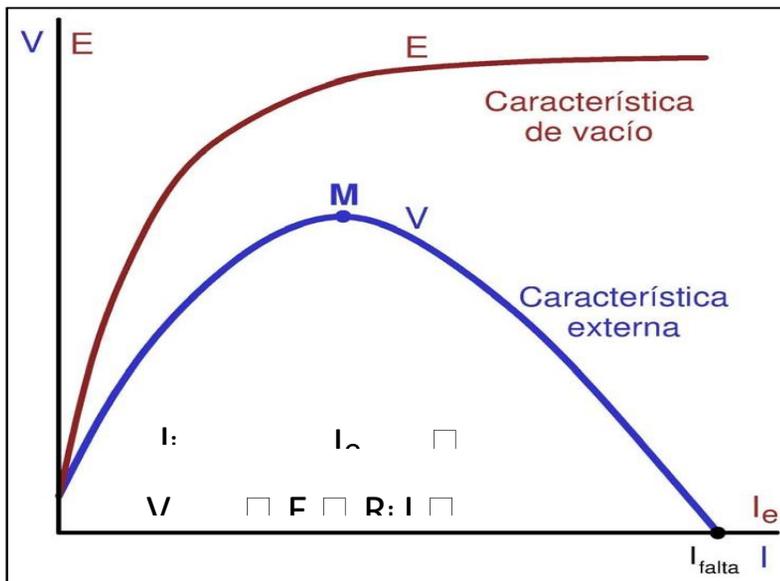
(si lo hay, lo que no es habitual en generadores).

- En una máquina serie el devanado inductor tiene poca resistencia. Es de pocas espiras de gran sección para que puedan soportar la corriente I_i .
- Es posible modificar la corriente I_e mediante un reóstato de baja

resistencia en paralelo con el inductor. En este caso I_e es una fracción α (menor que 1)

de $I_i = I$ y el parámetro R_i incluye la resistencia del conjunto en paralelo de este reóstato y del inductor (ver el motor serie y el anexo A).

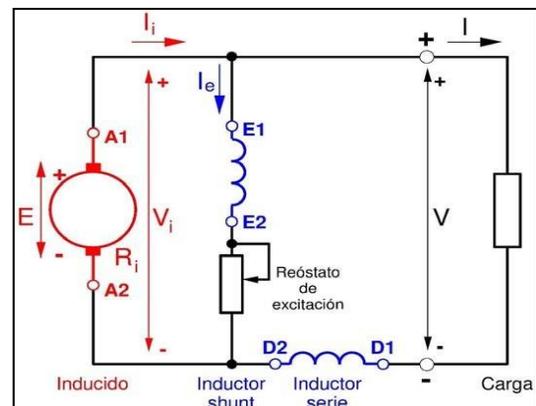
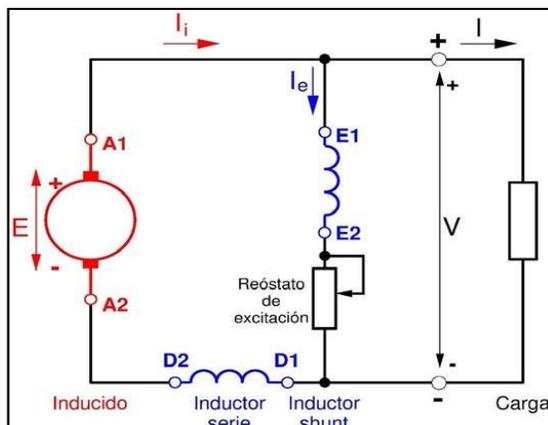




Característica exterior de un generador serie

- Para corrientes I pequeñas predomina el aumento del flujo Φ y de la f.e.m. E al crecer I ($I_e = \alpha I$) sobre la disminución de tensión debida a la resistencia R_j y a la reacción de inducido (si esta no se elimina mediante los devanados auxiliares).
- Por esta razón, a la izquierda del punto M la tensión V crece al aumentar la corriente I (funcionamiento *inestable*).
- Para corrientes I altas la máquina se satura y el Φ y la f.e.m. E ya no aumentan con la corriente I . Por esta razón, a la derecha del punto M la tensión V disminuye al aumentar la corriente I (funcionamiento *estable*).
- La corriente de cortocircuito I_{falta} es mayor que en el generador shunt y es varias veces superior a la corriente asignada.
- Este tipo de generador apenas se utiliza en la práctica.

2.3. 8 Generador Compound.

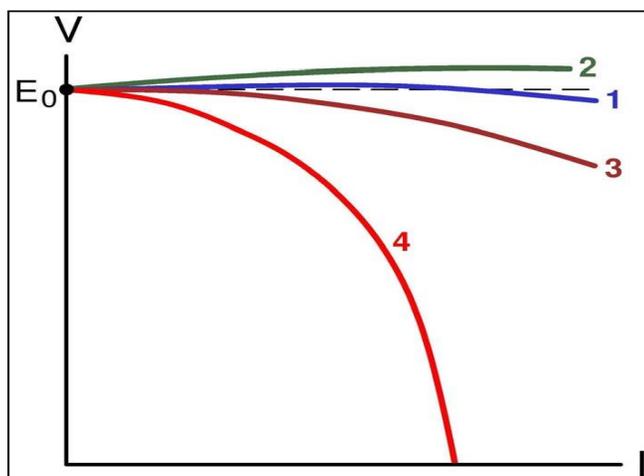


**Generador de excitación compound o
compuesta de larga derivación**

**Generador de excitación compound o
compuesta de corta derivación**

Todas estas conexiones corresponden a compound aditiva. Para la compound diferencial hay que invertir las conexiones de la excitación serie.

Característica externa de un generador compound



- 1: Compuesta plana
- 2: Hipercompuesta
- 3: Hipocompuesta
- 4: Diferencial

(1, 2 y 3 son máquinas compound aditivas)

- La característica externa de una máquina compound se obtiene combinando las correspondientes características externas de las máquinas serie y shunt.
- Apenas hay diferencias entre las conexiones compound (o compuesta) *corta* y *larga* porque la caída de tensión en el devanado inductor serie es muy pequeña.
- Según que la fuerza magnetomotriz (f.m.m.) del inductor serie se sume o se reste a la f.m.m. del inductor shunt, la conexión compound es *aditiva* o *diferencial*, respectivamente.
- Una máquina compound aditiva puede ser: compuesta plana, hipercompuesta o hipocompuesta.
- En la conexión compuesta plana al subir la corriente I el incremento de V originado por el aumento de la excitación serie compensa a la caída de V que habría si solo actuara el inductor shunt, de forma que para la corriente asignada se mantiene la misma tensión que en vacío. La tensión V se conserva prácticamente constante para corrientes I desde el vacío ($I = 0$) hasta la asignada.
- Si se aumenta el número de espiras del devanado inductor serie con respecto a la máquina compuesta plana se obtiene la máquina hipercompuesta. En ella la tensión V sube con la corriente I y, así,

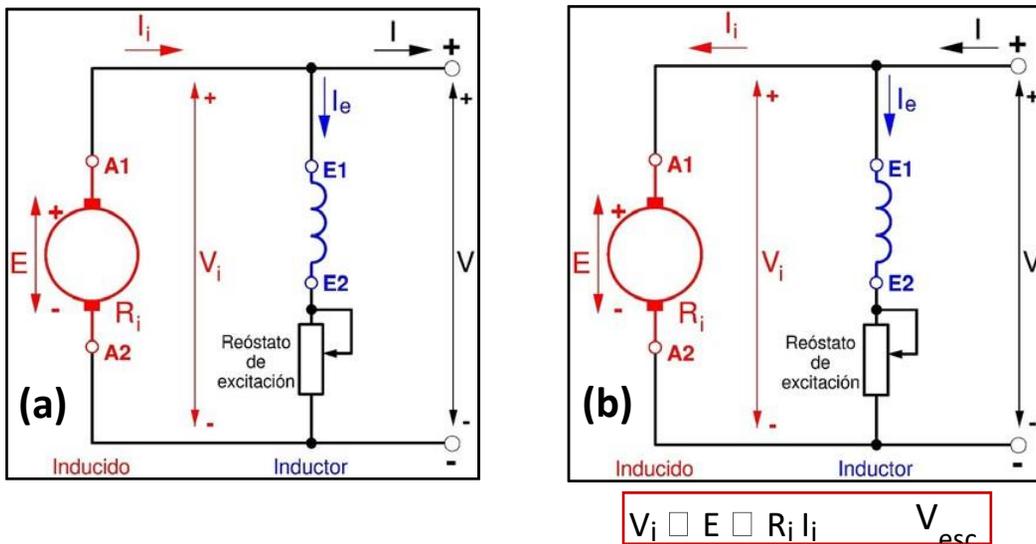
se

pueden
compensar

las caídas de tensión en las líneas entre el generador y la carga. De esta manera la tensión en la carga permanece prácticamente constante.

- Si se reduce el número de espiras del devanado inductor serie con respecto a la máquina compuesta plana se obtiene la máquina hipocompuesta. En ella la tensión V baja con la corriente I , aunque en menor medida que en una máquina con excitación shunt.
- Si se invierte el inductor serie para que su f.m.m. se reste a la del inductor shunt se tiene la máquina compound diferencial. En ella existe una fuerte bajada de tensión V con la corriente I y su corriente de cortocircuito es pequeña. Estas máquinas se utilizan en aplicaciones como en la soldadura por arco eléctrico.

2.3.9 Funcionamiento como motor y como generador



- Una máquina de c.c. conectada a una red eléctrica actúa inicialmente como **generador** (a) con un **par de frenado** y generando una **f.e.m.** E . La tensión en bornes del inducido V_i es inferior a E y la corriente en el

inducido I_j tiene

sentido saliente hacia la red eléctrica.

- Si la f.e.m. E se hace menor que la tensión V_i , la corriente I_j y la tensión V_{esc} se invierten y la máquina pasa a funcionar como **motor (b)**. E es entonces una **f.c.e.m.** y la máquina ejerce un **par motor**.

Capítulo III Transformadores

Resultado de aprendizaje.

Entiende el principio de funcionamiento de los transformadores y experimenta con las diferentes conexiones y configuraciones aplicándolos a diferentes entornos que pudiera presentarse en el ámbito práctico.

Analiza desde el punto de vista técnico las diferencias entre valores medidos en el laboratorio y los obtenidos en la teoría y se obtiene conclusiones al respecto.

Aplica los conocimientos de los transformadores a casos reales que pueden presentarse en el entorno industrial.

3.1 Transformadores monofásicos

3.1.1 Introducción

El transformador es un dispositivo que permite modificar potencia eléctrica de corriente alterna con un determinado valor de tensión y corriente en otra potencia de casi el mismo valor pero, generalmente con distintos valores de tensión y corriente.

Es una máquina estática de bajas pérdidas y tiene un uso muy extendido en los sistemas eléctricos de transmisión y distribución de energía eléctrica

Cuando se requiere transportar energía eléctrica, desde los centros de generación (Centrales eléctricas) a los centros de consumo, se eleva la tensión (desde unos 15 kV hasta 132, 220 o 500 kV) y se efectúa la transmisión mediante líneas aéreas o subterráneas con menor corriente, ya que la potencia en ambos lados del transformador es prácticamente igual, lo cual reduce las pérdidas de transmisión ($R I^2$).

En la etapa de distribución se reduce la tensión a los valores normales (380/220 V), mediante los transformadores adecuados.

3.1.2 Transformador monofásico

Básicamente está formado por un núcleo compuesto de láminas de hierro y dos bobinados, a los cuales denominaremos primario y secundario.

El bobinado primario con “ N_1 ” espiras es aquel por el cual ingresa la energía y el secundario con “ N_2 ” espiras es aquel por el cual se suministra dicha energía.

Núcleo de láminas de acero

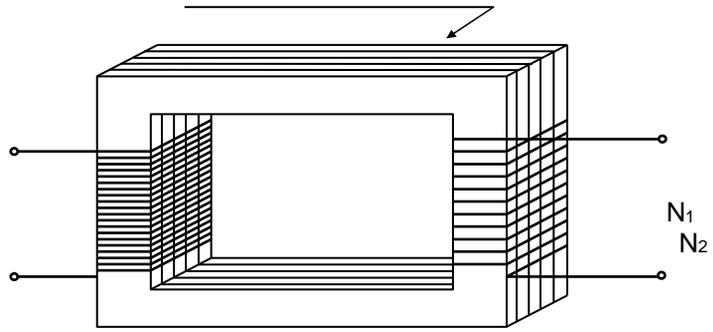


Fig. 3. 1 Esquema de un transformador monofásico tipo núcleo

Un transformador funciona bajo el principio de la inducción mutua entre dos bobinas acopladas inductivamente. Según el grado de acoplamiento magnético la energía se transmite de un circuito al otro; el grado de acoplamiento es bajo cuando se tiene un núcleo de aire, pero cuando las bobinas están sobre un núcleo de hierro, estas están fuertemente acopladas, en este caso toda la energía recibida desde la fuente de alimentación por un circuito primario se transfiere al secundario debido a la acción transformadora.

En la figura 3.2 se observa el circuito que representa a un transformador real dividido en 2 circuitos en donde el circuito 1 representa el primario y el circuito 2 el secundario.

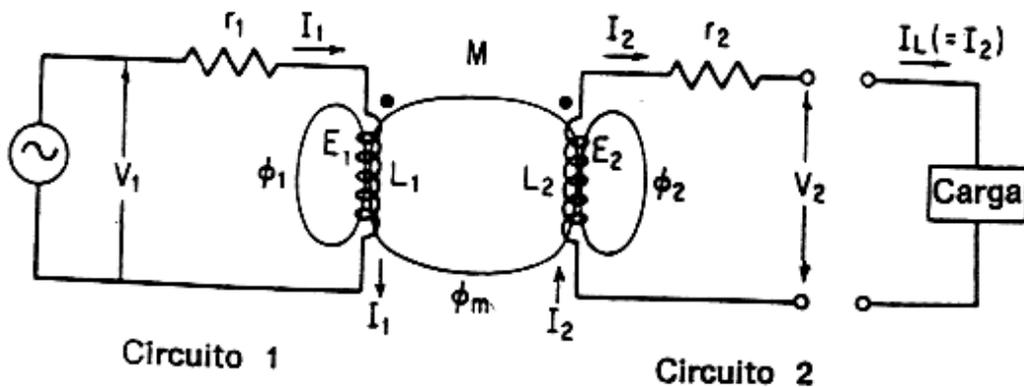


Figura 3.2

Los parámetros eléctricos del esquema del transformador que se observa en la figura 3.2, representan:

- V_1 = Tensión Bobinado Primario (Voltios)
- r_1 = Resistencia Bobinado Primario (Ohmios)
- L_1 = Inductancia Bobinado Primario (Henrios)
- X_{L1} = Reactancia Inductiva Bobinado Primario (Ohmios)
- I_1 = Corriente Bobinado Primario (Amperios)
- E_1 = Tensión Inducida en el Bobinado Primario (Voltios) debido al flujo concatenado ϕ_m
- E_2 = Tensión Inducida Bobinado Secundario (Voltios)
- I_2 = Corriente Bobinado Secundario (Amperios)
- r_2 = Resistencia Bobinado Secundario (Ohmios)
- L_2 = Inductancia Bobinado Secundario (Henrios)
- V_2 = Tensión en Bornes Bobinado Secundario (Voltios)
- X_{L2} = Reactancia Inductiva Bobinado Secundario (Ohmios)
- ϕ_1 y ϕ_2 = Flujos por dispersión producidos en las inductancias L_1 y L_2 .
- M = Inductancia Mutua entre las Bobinas primaria y secundaria (Henrios)

El coeficiente de acoplamiento magnético K se define por la expresión:

$$K = \frac{\phi_m}{\phi_m + \phi_1 + \phi_2} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (3.1)$$

En donde: K = Coeficiente de acoplamiento
 ϕ_m = Flujo mutuo
 ϕ_1 y ϕ_2 = Flujos de dispersión de los bobinados 1 y 2

El punto es para mostrar la polaridad positiva o negativa de la tensión inducida.

3.1.2 Transformador Ideal

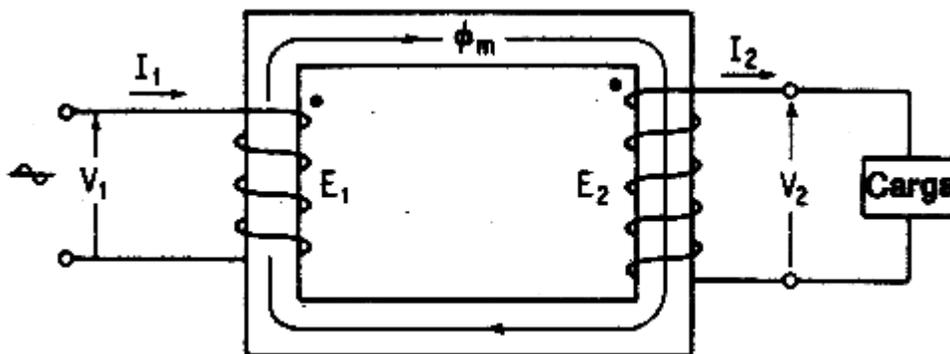


Figura 2.2. Representación Transformador con núcleo de hierro, caso ideal.

En el caso de un transformador ideal el coeficiente de acoplamiento magnético es 1.

$$K = \frac{\phi_m}{\phi_m + \phi_1 + \phi_2} = 1$$

$$K = 1$$

Debido a que no existen pérdidas en los bobinados primario y secundario, los flujos de dispersión ϕ_1 y $\phi_2 = 0$, o sea:

$$V_1 I_1 = V_2 I_2 \quad (3.2)$$

La fuerza electromotriz inducida en los circuitos primario y secundario viene dado por las ecuaciones:

$$E_1 = \frac{L_1 dI_1}{dt} + \frac{M dI_2}{dt} \quad (3.3)$$

$$E_2 = \frac{L_2 dI_2}{dt} + \frac{M dI_1}{dt} \quad (3.4)$$

En resumen, en un transformador ideal los flujos de dispersión ϕ_1 y ϕ_2 son iguales a cero el coeficiente de acoplamiento del transformador $K = 1$ y solo existe un flujo mutuo ϕ_m a

través del núcleo.

3.1.3 Transformador real

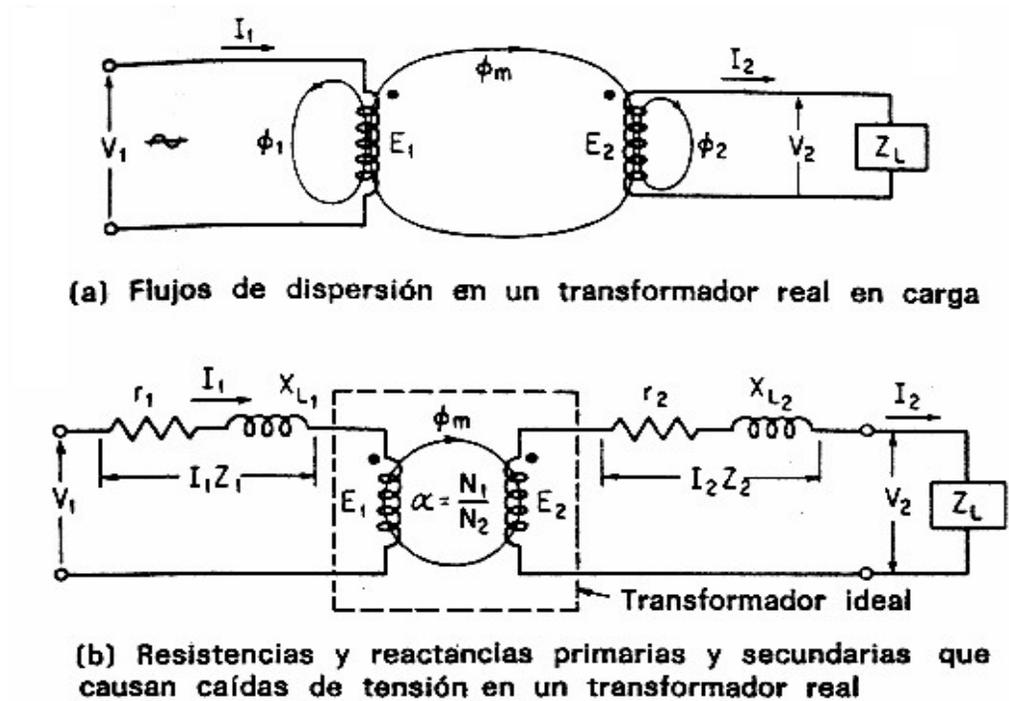


Figura 3.3. Transformador real

$$K = \frac{\phi_m}{\phi_m + \phi_1 + \phi_2} \neq 1$$

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \neq 1$$

En un transformador real aunque existe un buen acople magnético debido al núcleo de hierro, además del flujo mutuo se producen pequeños flujos de dispersión en las bobinas primaria y secundaria respectivamente.

ϕ_1 y ϕ_2 = Flujos de dispersión.

El flujo ϕ_1 produce una reactancia inductiva X_{L1} y ϕ_2 una reactancia inductiva X_{L2} . Los bobinados son devanados de cobre con una cierta resistencia en el primario y en el secundario respectivamente.

r_1 y r_2 = resistencia de cobre.

Estos bobinados producen caídas de tensión y pérdidas de potencia.

$Z_1 = r_1 + jX_{L1}$ = Impedancia interna del primario.

$Z_2 = r_2 + jX_{L2}$ = Impedancia interna del secundario.

La f.e.m. inducidas E_1 y E_2 viene dada por las ecuaciones

$$E_1 = V_1 - I_1 Z_1 = V_1 - I_1 (r_1 + jX_{L1}) \quad (3.3)$$

$$E_2 = V_2 + I_2 Z_2 = V_2 + I_2 (r_2 + jX_{L2}) \quad (3.4)$$

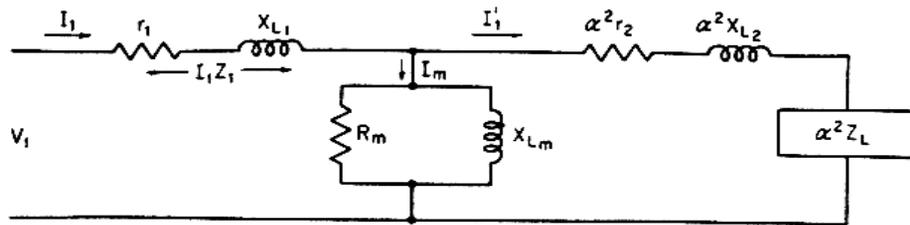
3.1.4 Circuitos Equivalentes.

En el circuito equivalente para un transformador de potencia real se puede considerar una rama que representa una resistencia y la reactancia del núcleo del transformador en donde los puntos R_m representan las pérdidas en el hierro, por Histéresis o corrientes parásitas, como consecuencia de la corriente magnetizante.

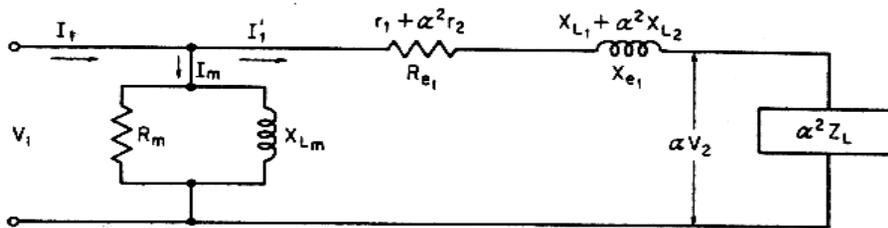
X_{Lm} = representa la reactancia del transformador en vacío que produce una pequeña caída de tensión en el núcleo del transformador.

Con carga $I_1 = I_1' + I_m$

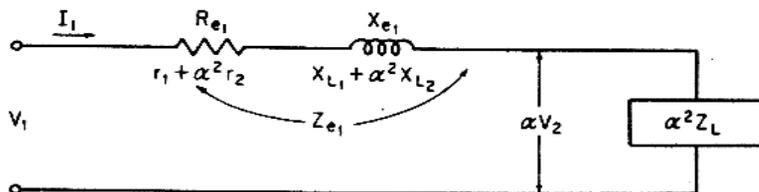
En vacío $I_1 = I_m$ pérdidas en vacío = $I_m^2 R_m$ = bajos
 $R_m = I_m E 0$



(a) Circuito equivalente de un transformador de potencia



(b) Circuito equivalente aproximado con resistencias y reactancias agrupadas



(c) Circuito equivalente simplificado suponiendo despreciable la corriente magnetizante

Figura .3.4. Circuitos equivalentes para un transformador de potencia referido al primario,

La relación de transformación viene dada por la ecuación

$$\alpha = \frac{V_1}{V_2}$$

De donde:

$$V_2 = \frac{V_1}{\alpha} \Rightarrow V_1 = \alpha V_2$$

Por otro lado:

$$\frac{I_2}{I_1} = \alpha$$

De donde:

$$I_2 = \alpha I_1 \Rightarrow I_1 = \frac{I_2}{\alpha}$$

La relación entre impedancias primaria y secundaria es:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \alpha^2$$

Considerando que:

$$Z_1 = r_1 + jX_{L1}$$

$$Z_2 = r_2 + jX_{L2}$$

Se derivan las siguientes ecuaciones:

$$\frac{r_1}{r_2} = \alpha^2 \Rightarrow r_2 = \frac{r_1}{\alpha^2} \Rightarrow r_1 = \alpha^2 r_2$$

$$\frac{X_{L1}}{X_{L2}} = \alpha^2 \Rightarrow X_{L2} = \frac{X_{L1}}{\alpha^2} \Rightarrow X_{L1} = \alpha^2 X_{L2}$$

a.- Cargas con factor de potencia Capacitivo.

$$\frac{I_2}{\alpha} \quad I_1 \text{ adelanta } \langle V_2$$

$$V_1 = \langle V_2 + I_1 R_{e1} + jX_{e1} I_1$$

$$V_1 = \langle V_2 + I_1 Z_{e1}$$

$$\nabla_1 < \nabla_2$$

b.- Cargas con factor de potencia Inductivo.

La corriente secundaria de carga reducida al primario retrasa respecto a la tensión en bornes un ángulo ∇_2 .

$$\nabla_1 > \nabla_2 = \text{cargas inductivas}$$

$$V_1 = \langle V_2 + I_1 R_{e1} + I_1 X_{e1}$$

$$V_1 = \langle V_2 + I_1 Z_{e1}$$

c.- Cargas con factor de potencia unidad

La intensidad secundaria de la carga reducida al primario I_2 / α está en fase con la tensión en los bornes secundarios referido al primario $\langle V_2$

Caída de tensión

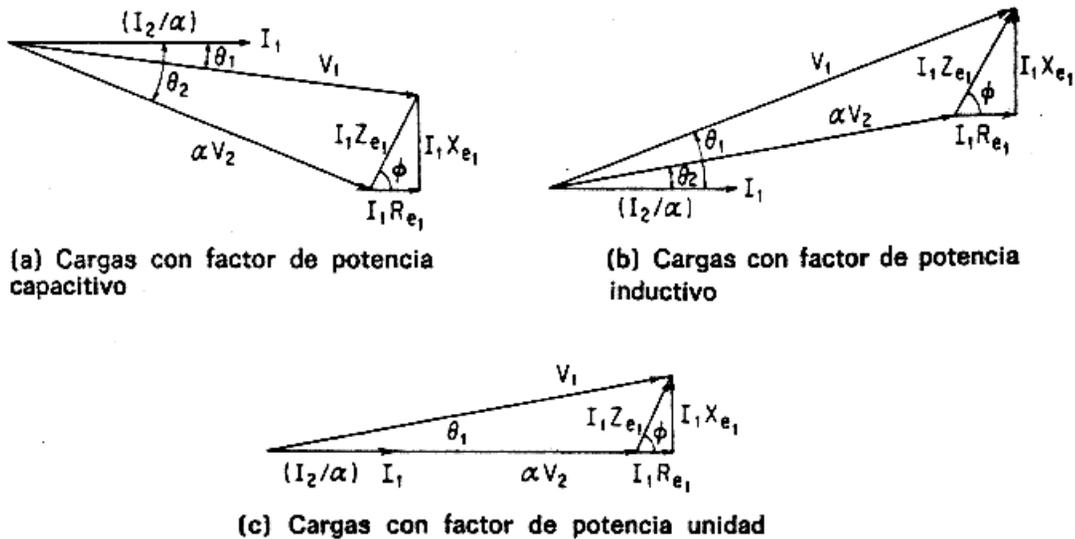
$$\otimes_{V_1} = Z_{e1} I_1$$

$$\otimes_{V_1} = R_{e1} I_1 + jX_{e1} I_1$$

$$V_1 = \langle V_2 + I_1 Z_{e1}$$

$$V_1 = \langle V_2 + I_1 (R_{e1} + jX_{e1})$$

La tensión V_1 adelanta un ángulo θ_1 respecto a la corriente debido a la inductancia interna del transformador.



Transformador de potencia en condiciones variables de carga secundaria y su efecto sobre el factor de potencia primario.

Figura 3.5.

3.1.5 Regulación de Tensión.

La regulación de voltaje o tensión de un transformador se define como el cambio del voltaje secundario (expresado en % del voltaje nominal secundario) que ocurre cuando se reduce a cero los KVA. de carga nominales, manteniendo constante al voltaje en los terminales del devanado primario. La regulación del voltaje (porcentaje) se puede calcular para cualquier carga y factor de potencia mediante la siguiente formula.

$$R \% = \frac{\text{tensión en vacío} - \text{tensión de carga}}{\text{tensión en vacío}} * 100$$

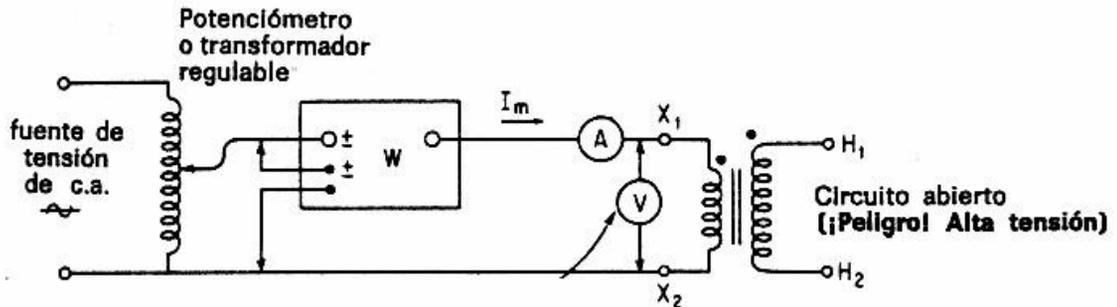
La regulación de tensión en un transformador de potencia es la relación entre la tensión en bornes de la carga secundaria y la tensión del secundario en vacío, para calcular esto se debe referir todos los parámetros del transformador al lado secundario.

Para cualquier valor de la corriente de carga resulta posible calcular la f.e.m. en el devanado secundario y la regulación de tensión del transformador. La corriente de carga depende del factor de potencia de la misma.

3.1.6 Prueba de Vacío.

El objetivo de esta práctica es medir las pérdidas sin carga (pérdidas en el hierro) para

compararlas con los valores normalizados de fábrica (perdidas máximas en el núcleo).



Conexión típica de instrumentos en el ensayo de vacío para la determinación de las pérdidas en el hierro.

Figura 3.6.

Se debe trabajar en el bobinado de baja tensión aplicando tensión nominal a los terminales X_1 , X_2 (no puede sobrepasarse de la tensión nominal).

Los terminales de alta tensión H_1 y H_2 deben estar abiertos, deben tomarse precauciones para que los terminales de alta tensión estén aislados entre si y del personal.

La finalidad principal de realizar un ensayo de circuito abierto es medir las pérdidas en el hierro del transformador. El procedimiento para realizar la prueba es el siguiente:

1. Variar la tensión de la fuente de voltaje variable hasta alcanzar la tensión nominal del devanado de baja tensión.
2. Anote la potencia de vacío, la tensión nominal y la corriente magnetizante que se hayan medido en el Vatímetro, Voltímetro y Amperímetro respectivamente.
3. Calcular las pérdidas en el hierro a partir de la ecuación:

$$P_h = P_{OC} - I_m^2 R_X$$

Donde:

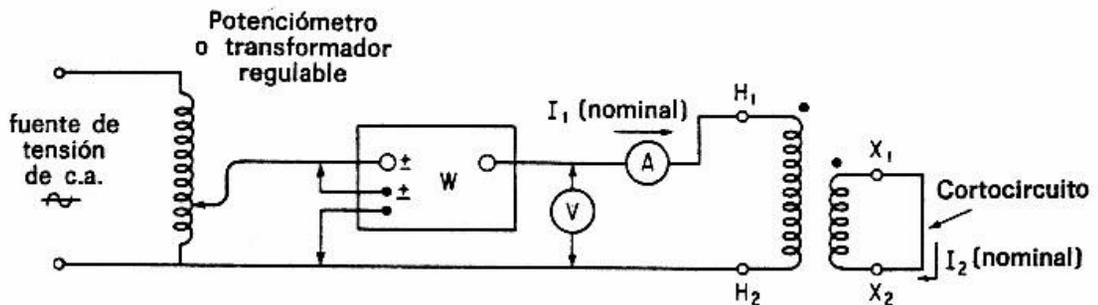
R_X = Resistencia del Bobinado de baja tensión.

Como el transformador está en vacío la corriente de magnetización es muy pequeña, por lo que se acostumbra tomar la lectura del Vatímetro, como el valor de las pérdidas en el hierro

$$P_h = P_{OC} = \text{Lectura del Vatímetro.}$$

3.1.7 Pruebas de Cortocircuito.

La prueba de cortocircuito en un transformador simula las mismas condiciones a las que operará en el sitio de trabajo con su carga nominal.



Conexión típica de instrumentos en el ensayo de cortocircuito para determinar Z_{e1} , X_{e1} y R_{e1} .

Figura 3.7.

Si el secundario del transformador se pone en cortocircuito tanto el voltaje V_2 como la impedancia de carga son iguales a cero. El transformador solamente queda cargado por sus propias reactancias y resistencias internas del primario y secundario.

La corriente I_1 absorbida depende del voltaje V_1 y de la impedancia interna.

Esto implica que al medir la tensión, la intensidad y la potencia del primario cuando el transformador está en cortocircuito, se puede proporcionar los parámetros del transformador referidas al primario

Procedimiento.

1. Ajustar a cero la tensión de la fuente y cortocircuitar los terminales de baja tensión X_1 y X_2 del transformador.
2. Aumente lenta y cuidadosamente el voltaje hasta que el amperímetro señale la intensidad nominal del primario.
3. Anote los valores de potencia de cortocircuito, voltaje de cortocircuito y la corriente de cortocircuito P_{sc} , V_{sc} e I_{sc} .
4. Calcule la impedancia interna referido al primario.

$$Z_{e1} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} = \frac{\text{Lectura_del_Voltímetro}}{\text{Lectura_del_Amperímetro}}$$

5. Calcular la resistencia interna referida al primario.

$$Re_1 = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} = \frac{Lectura_del_Vatimetro}{(Lectura_del_Amperímetro)^2}$$

6. Calcular la reactancia interna referida al primario

$$a) \quad X_{e1} = \sqrt{Z_{e1}^2 - Re_1^2}$$

$$\cos \vartheta = \frac{Re_1}{Z_{e1}}$$

$$b) \quad X_{e1} = Z_{e1} \sin \vartheta$$

3.1.8 Pérdidas en el Cobre y en el Hierro.

Existen básicamente dos grupos de pérdidas fundamentales:

- a) Pérdidas en el cobre.
- b) Pérdidas en el hierro.

Pérdidas en el Cobre (ensayo de corto circuito)

La circulación de corriente en los devanados del transformador ocasionan pérdidas en éste, las mismas que están regidas al efecto Joule. Esta energía se transforma en calor al igual que las pérdidas en vacío de manera que se consideran ambos factores para el estudio térmico.

Las pérdidas en el cobre se expresan como una potencia absorbida de la red por el transformador, potencia que no es aprovechable en el secundario para el circuito de carga, cuanto menores sean estas pérdidas mayor será el rendimiento del transformador.

Estas pérdidas se pueden calcular conociendo las resistencias óhmicas de los devanados y a las corrientes circulantes, por las mismas a plena carga, siendo directamente proporcionales al cuadrado de las corrientes, las pérdidas en los transformadores se expresan en vatios.

Las pérdidas en el cobre son las registradas esencialmente por el Vatímetro y se deben a las resistencias de los devanados primario y secundario referidas al lado de alta tensión.

$$P_{sc} = Re_1 I_{sc}^2$$

$$P_{cu} = Re_1 I_1^2$$

Pérdidas en el Hierro (Ensayo de vacío)

Las causas principales de pérdidas en el hierro cuando un núcleo de este material está sometido a la acción de campos magnéticos de intensidad variada, son:

- Por Histéresis a efecto de saturación y remanencia magnética de hierro, su magnitud se debe al tipo de hierro, dimensiones y el grado de inducción magnética y a la frecuencia y.
- Por pérdidas debido a corrientes parásitas.

Las pérdidas en el hierro a la tensión nominal o de funcionamiento sólo pueden obtenerse excitando uno cualquiera de los devanados del transformador a su tensión nominal.

Como la mayoría de los transformadores de potencia de transporte y de distribución tiene uno o más arrollamientos de alta tensión, lo más corriente y seguro para realizar el ensayo de vacío para determinar las pérdidas en el hierro se debe trabajar en el arrollamiento de baja tensión.

$$P_h = P_{OC} - I_m^2 R_X$$

Pérdidas en el hierro (Ensayo de Cortocircuito)

Las pérdidas en el hierro varían aproximadamente con el cuadrado de la densidad de flujo o con el cuadrado de la tensión aplicada al primario. Tensión y frecuencia nominales, las pérdidas en el hierro de un transformador no son despreciables.

Las pérdidas en el hierro para un transformador de potencia son verdaderamente despreciables para las tensiones extremadamente reducidas en el lado de alta.

La mayoría de las transformaciones de potencia con posible excepción de los transformadores extremadamente pequeños o de los de alta frecuencia de núcleo de hierro, las pérdidas en el hierro pueden despreciarse en la mayoría de las condiciones de ensayo de cortocircuito.

3.1.9 Rendimiento del Transformador.

El rendimiento de un transformador para cualquier valor de carga viene dada por la siguiente ecuación o fórmula :

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{salida} + Perdidas} = \frac{V_2 I_2 \cos \vartheta_2}{V_2 I_2 \cos \vartheta_2 + P_{hierro} + I_2^2 R_{e_2}}$$

Dentro de estos términos el único fijo es el de las perdidas en el hierro.

El término de la potencia y el de las pérdidas equivalentes en el cobre están en función de la

potencia de la corriente de la carga secundaria.

El rendimiento es máximo o eficiente cuando las pérdidas fijas son iguales a las pérdidas variables.

$$| \max \text{ } \textcircled{R} \text{ } P_{cu} = P_h$$

$$P_h = I_2^2 R_{e2}$$

El valor de la intensidad de carga del secundario para el que se consigue rendimiento máximo viene dada por:

$$I_2 = \frac{P_h}{\sqrt{R_{e2}}}$$

La reducción del factor de potencia de la carga ($\cos \nabla_2$), reduce el rendimiento del transformador. Para cargas relativamente pequeñas las pérdidas fijas en el hierro son elevadas con relación a la potencia de salida y el rendimiento es bajo.

Con cargas fuertes mayores que la nominal las pérdidas variables en el cobre son elevadas en proporción de la salida y el rendimiento es bajo.

3.1.10 Identificación de Fases y Polaridad.

La identificación de fases es un proceso mediante el cual se identifican los terminales individuales que constituye cada una de las bobinas del transformador, el ensayo de polaridad se realiza de manera que los terminales individuales en los devanados y bobinas independientes del transformador puedan ser marcadas o codificadas de manera que se identifique los terminales que tengan igual polaridad relativa instantánea.

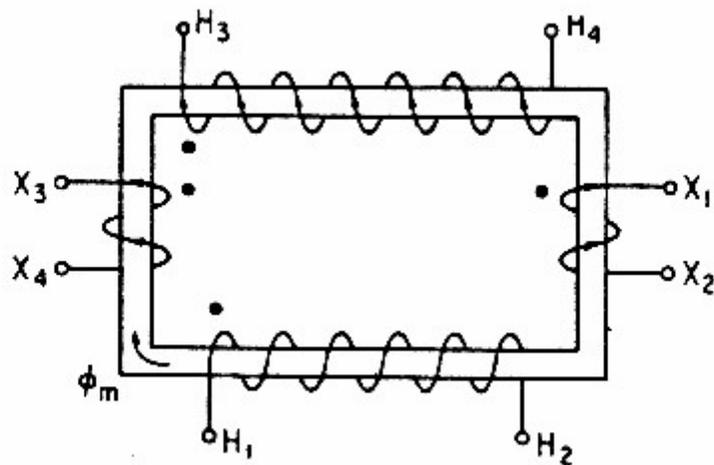


Figura 3.8 a

Identificación de fases. – las bobinas de alta tensión tienen muchas espiras y están codificadas con la “H” para designar sus terminales, los terminales de baja tensión están designados con la letra “X”.

Polaridad de los transformadores.- la polaridad relativa e instantánea de un transformador luego de haber identificado sus fases se determina utilizando un voltímetro de C. A. y una fuente de tensión de C. A. adecuada.

Los transformadores monofásicos que tengan valores nominales en alto voltaje de hasta 13800 V. serán de polaridad aditiva y para voltajes mayores a 13800 de polaridad sustractiva

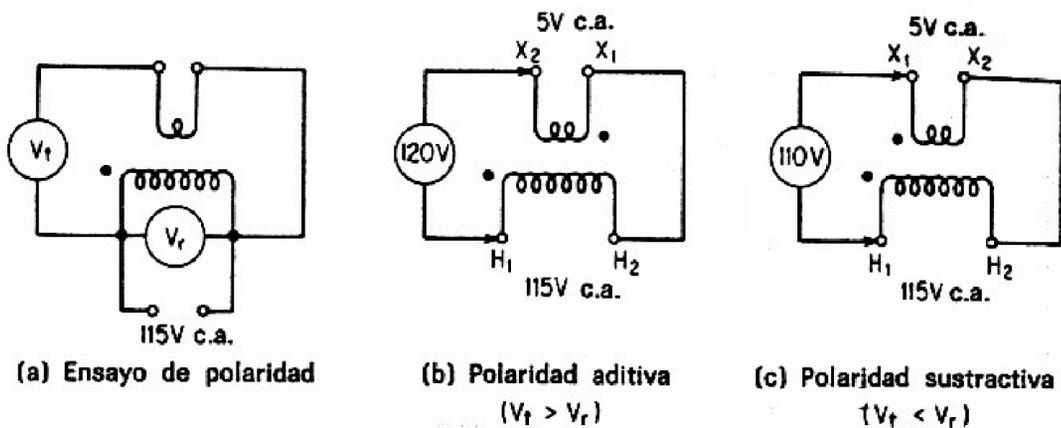


Figura .3.8.b.

El ensayo de polaridad consta de las siguientes etapas:

1. Seleccionar cualquier bobinado de A. T. Para usarla como bobina de referencia.
2. Una mediante una conexión un terminal de la bobina de referencia con un terminal de cualquier otro bobinado de polaridad desconocida.
3. Conectar el otro terminal de la bobina de referencia con un punto de polaridad positiva.
4. Conectar el voltímetro de C. A. entre el terminal marcado con el punto de la bobina de referencia y el otro terminal de la bobina desconocida.
5. Aplicar tensión nominal inferior al de la bobina de referencia.
6. Anotar los valores de tensión en los bornes de la bobina de referencia y el de tensión de ensayo entre bobinas.
7. Si la tensión de ensayo es mayor que la tensión de la bobina de referencia la polaridad es aditiva y debe marcarse un punto en la bobina ensayada.
8. Si la tensión de ensayo es menor que la tensión de referencia la polaridad es sustractiva y debe marcarse un punto en la bobina ensayada.
9. Marcar el terminal con un punto de la bobina de referencia con la denominación H_1 y el terminal marcado con un punto de la bobina ensayada con X_1 o cualquier designación adecuada de números impares.
10. Repetir las etapas del 2 al 9 anteriores para los restantes bobinados del transformador.

3.1.11 Conexión de Bobinados en Serie y en Paralelo.

La identificación de fases y la polaridad son fundamentales al considerar las maneras en que un transformador con varios devanados o varios transformadores individuales pueden conectarse en serie o en paralelo.

Consideremos un transformador con varios arrollamientos que tienen una tensión nominal de 115 V en cada una de las bobinas de alta tensión y 10 V en 2 bobinas de baja tensión, usando este transformador es posible obtener 4 relaciones de tensión.

Estas combinaciones son:

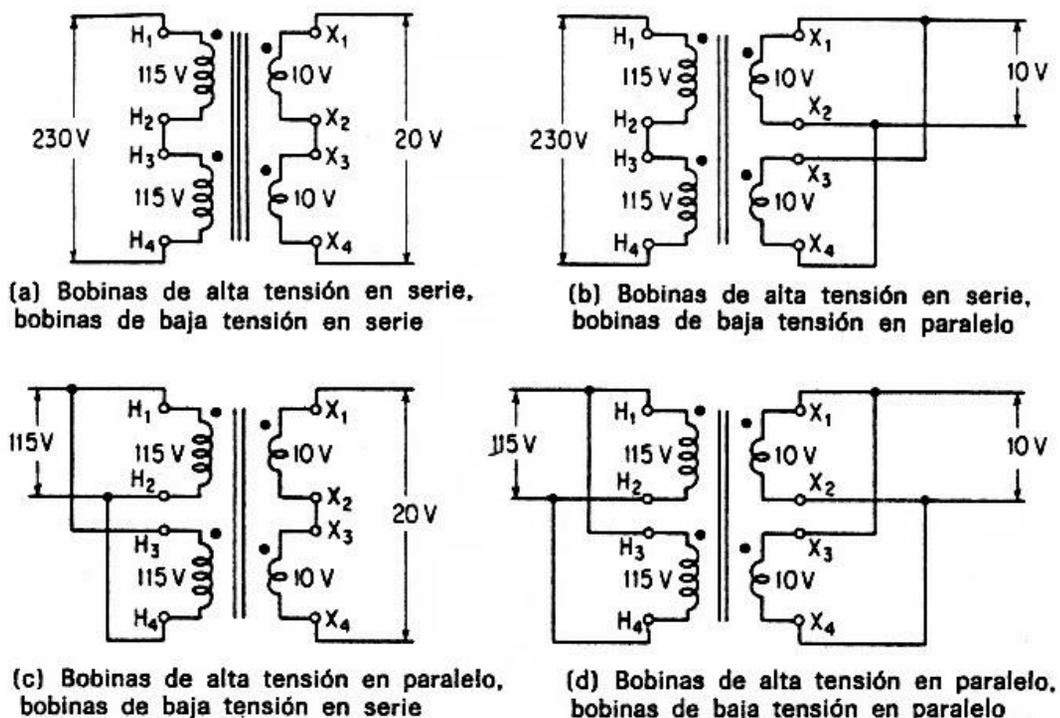


Figura 3.9.

3.1.12 Armónicos e importancia del neutro en los Transformadores.

Armónicos.- con frecuencia en los ensayos de laboratorio al usar un voltímetro como medida de precaución antes de cerrar el triángulo, en el voltímetro no se lee cero ni se lee una tensión de 2 veces la tensión compuesta, ya que existe aprehensión a cerrar el triángulo en presencia de tensión, la cual puede ser a veces de hasta 50V. En este caso la tensión medida es debida al tercer armónico relativamente elevado.

Los transformadores monofásicos cuando se excitan a tensión nominal producen un tercer armónico. Esto es debido a que la curva de saturación de los núcleos de los transformadores reales aumenta de manera pronunciada y se satura rápidamente, produciendo que la corriente magnetizante se distorsione.

En los transformadores trifásicos, sin embargo las 3 corrientes magnetizantes están desplazadas 120° entre sí, pero las corrientes del tercer armónico están en fase.

En una transformación Y – Y no existe camino cerrado para la corriente del tercer armónico ni en el primario ni secundario y las ondas de tensión de salida están distorsionadas. Esto se corrige proporcionando una línea neutra a tierra ya sea en el primario o en el secundario o en ambos.

Importancia del Neutro.- el neutro es importante para la supresión de los armónicos en los sistemas Y – Y, además en los sistemas Y – Y, Y - ⊗, ⊗ - Y, ⊗ - ⊗, el neutro proporciona las siguientes ventajas:

1. Un camino para las corrientes desequilibradas debidas a las cargas desequilibradas.
2. Un medio por el cual puede proporcionarse un servicio eléctrico doble.
3. Un medio por el cual las tensiones de fase se equilibran en relación con las tensiones de línea.

3.2 Transformadores trifásicos

A partir de ciertas potencias, los transformadores son trifásicos, pudiéndose armar un conjunto o “banco” trifásico, mediante el uso de tres transformadores monofásicos o bien un solo transformador trifásico, el cual se forma mediante un núcleo magnético y las bobinas necesarias para armar tres fases, tal como se observa en la figura 3.10.

De acuerdo a este esquema, las bobinas tanto primarias como secundarias, pueden ser conectadas en forma de estrella o triángulo, con lo cual se obtienen diferencias de fase entre las tensiones primarias y secundarias.

3.2.5 Conexiones normalizadas

De acuerdo a la forma en que se conectan los bobinados, los conjuntos trifásicos, están definidos por un grupo de conexión que los identifica mediante una nomenclatura que se determina por dos letras y un número según el siguiente detalle:

- La primera letra **mayúscula**, define la forma de conexión de los bobinados de **alta tensión**, la cual puede ser **D** (Triángulo) o **Y** (Estrella).
- La segunda letra **minúscula**, define la forma de conexión de los bobinados de **baja tensión**, la cual puede ser **d** (Triángulo) o **y** (Estrella).
- El número multiplicado por 30, define el ángulo de desfasaje entre las tensiones de fase equivalentes de alta y baja tensión.

Las conexiones normalizadas más utilizadas pertenecen a los grupos **0** (0°), **5** (150°), **6** (180°) y **11** (330°).

Grupos de conexión 0.

Por ejemplo, si conectamos los bobinados de alta y baja tensión en estrella de acuerdo al esquema de la figura 3.11

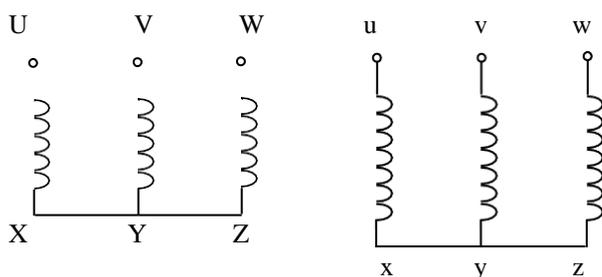
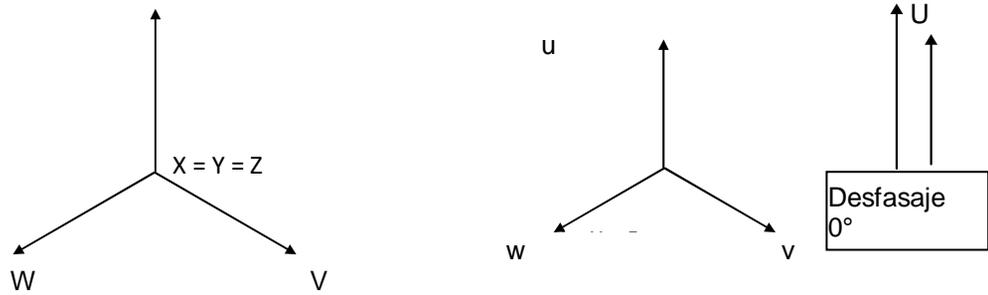


Figura 3.11 Conexión de los bobinados en estrella en alta y baja tensión

Los fasoriales correspondientes son los de la figura 3.12, los cuales se ejecutan teniendo en cuenta que cada tensión de fase del lado de baja tensión se corresponde con el de alta tensión, de acuerdo a las polaridades indicadas por las letras correspondientes.



Grupo de conexión **Y y 0**

Figura 3.12 Diagramas fasoriales para conexión estrella – estrella

En forma análoga en la figura 3.13 se conectan ambos bobinados en triángulo y en la figura 3.14 se muestran los fasoriales correspondientes.

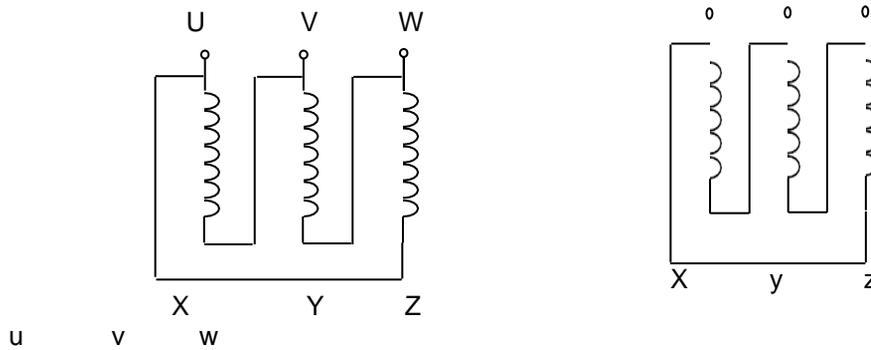
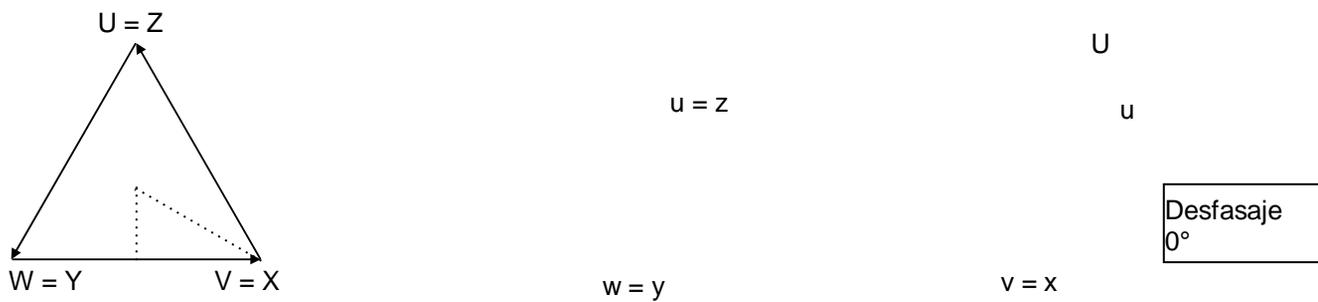


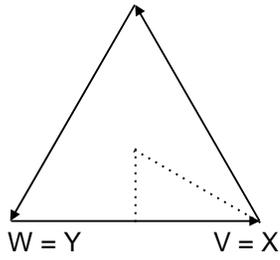
Figura 3.13 Conexión de los bobinados en triángulo en alta y baja tensión



Grupo de conexión **D d 0**

Figura 3.14 Diagramas fasoriales para conexión triángulo – triángulo

U = Z



$$u = z$$

U

u

$$w = y$$

Desfasaje
0°

$$v = x$$

Grupo de conexión D d 0

Figura 3.14 Diagramas fasoriales para conexión triángulo – triángulo

Grupos de conexión 5

En las figuras 3.15y 3.16 se analizan las conexiones triángulo estrella con sus fasoriales, para este tipo de grupo.

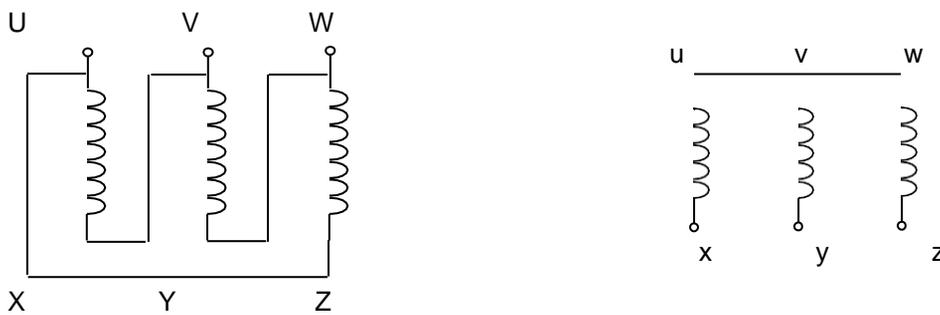
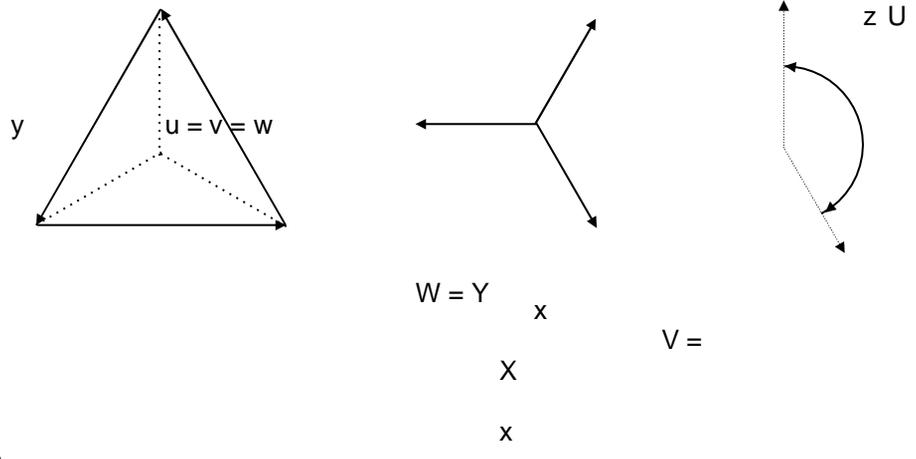


Figura 3.15 Conexión de los bobinados en triángulo del lado de alta y estrella del lado de baja tensión.

$$U = Z$$



Desfasaje
150°

Grupo de conexión **D y 5**

Figura 3.16 Diagramas fasoriales para conexión triángulo - estrella

En las figuras 3.17 y 3.18 se analizan las conexiones y fasoriales para el caso de los bobinados conectados en estrella triángulo.

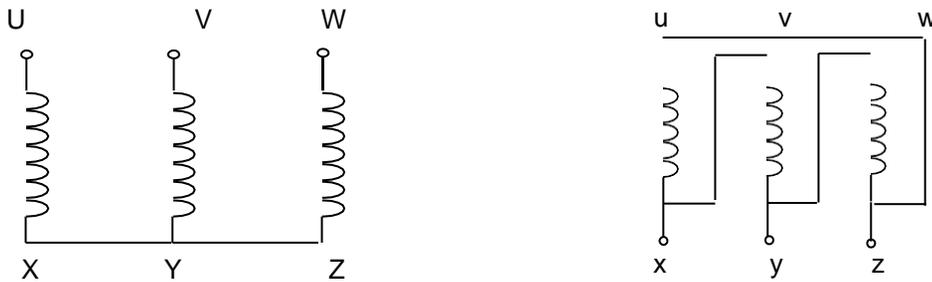
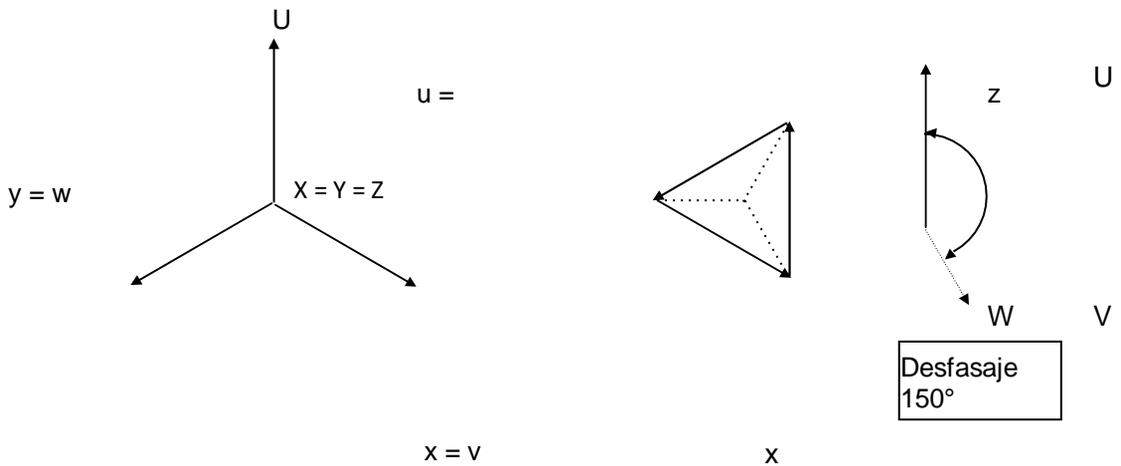


Figura 7.45 Conexión de los bobinados en estrella del lado de alta y triángulo del lado de baja tensión

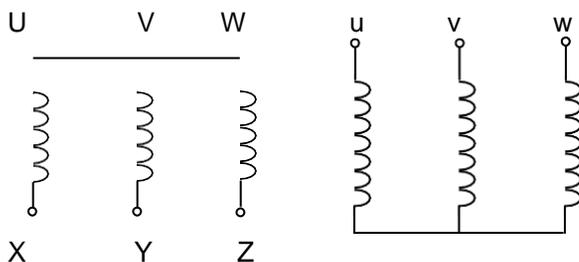


Grupo de conexión **Y d 5**

Figura 3.18 Diagramas fasoriales para conexión estrella - triángulo

Grupos de conexión 6

En las figuras 3.19 y 3.20 se analizan las conexiones y fasoriales para el caso de los bobinados conectados en estrella.



x y z

Figura 3.19 Conexión de los bobinados en estrella en alta y baja tensión

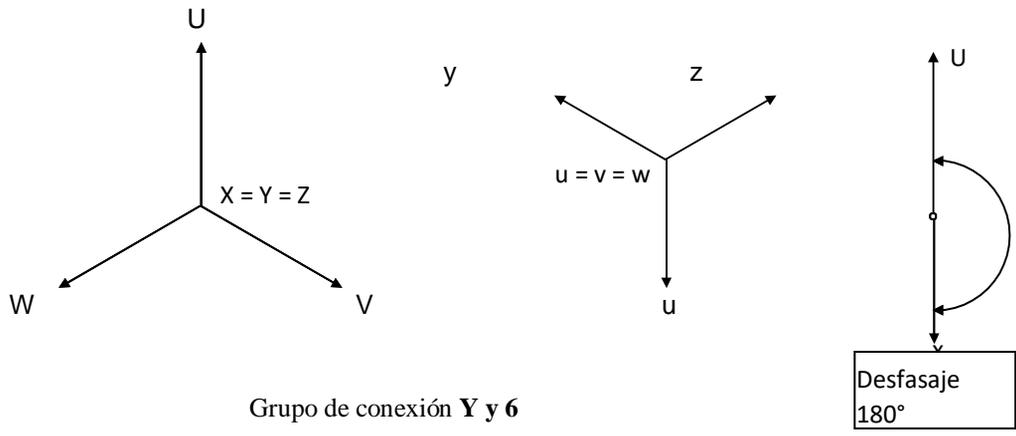


Figura 3.20 Diagramas fasoriales para conexión estrella – estrella

En las figuras 3.21 y 3.22 se analizan las conexiones y fasoriales para el caso de los bobinados conectados en triángulo.

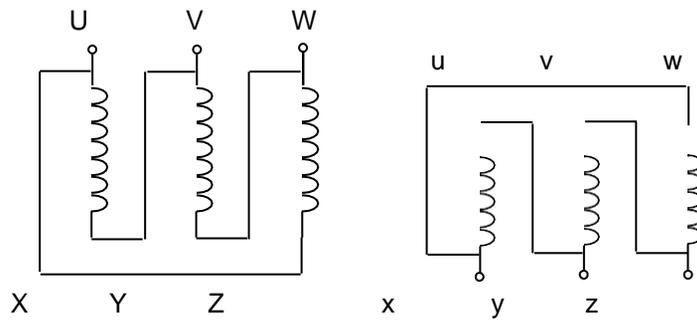


Figura 3.21 Conexión de los bobinados en triángulo en alta y baja tensión

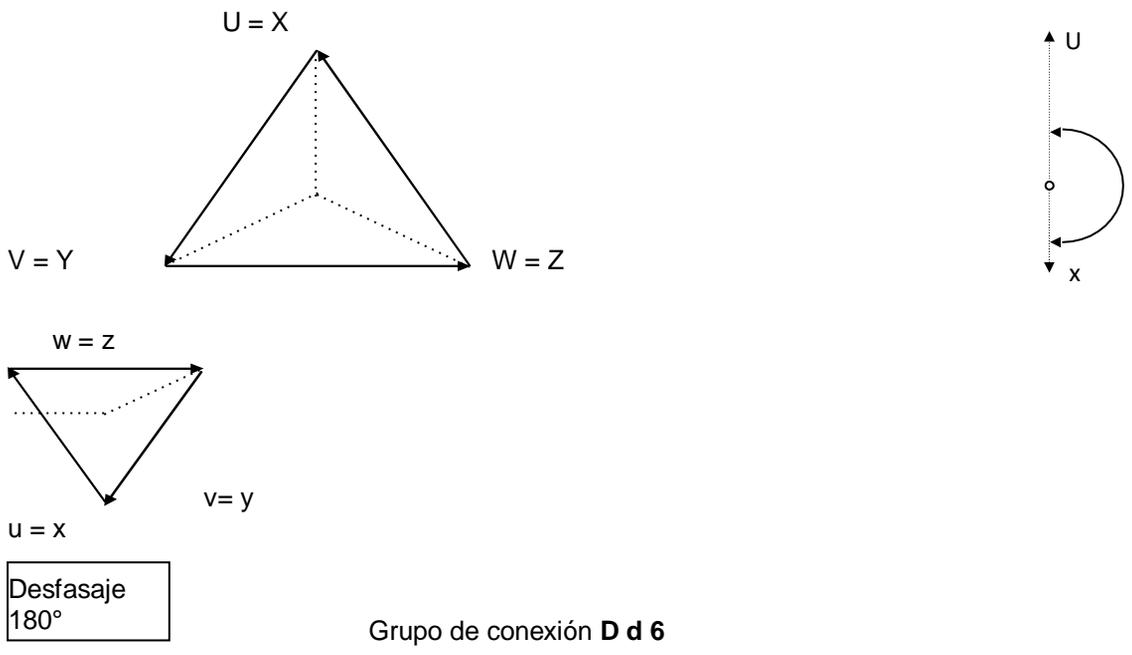


Figura 3.22 Diagramas fasoriales para conexión triángulo – triángulo

Grupo de conexión 11

En las figuras 3.23 y 3.24 se analizan las conexiones y fasoriales para el caso de los bobinados conectados en triángulo estrella.

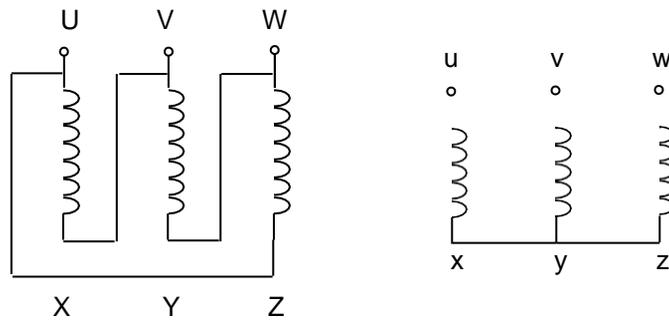
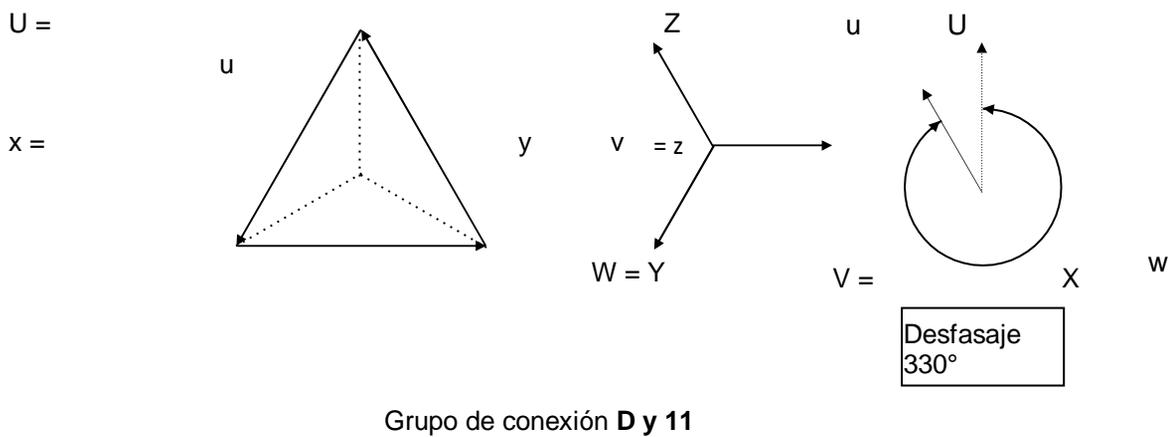


Figura 2.23 Conexión de los bobinados triángulo en alta y estrella en baja tensión



Grupo de conexión D y 11

Figura 3.24 Diagramas fasoriales para conexión triángulo - estrella

En las figuras 3.25 y 3.26 se analizan las conexiones y fasoriales para el caso de los bobinados conectados en estrella - triángulo.

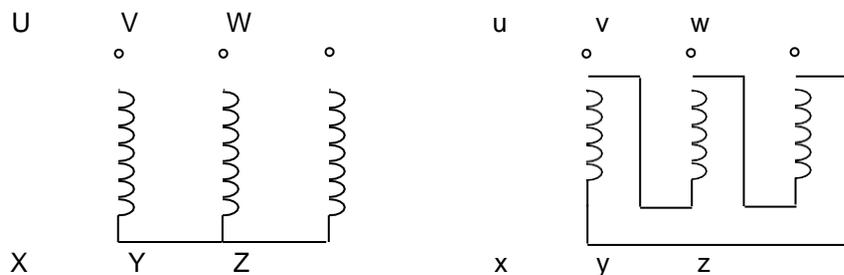
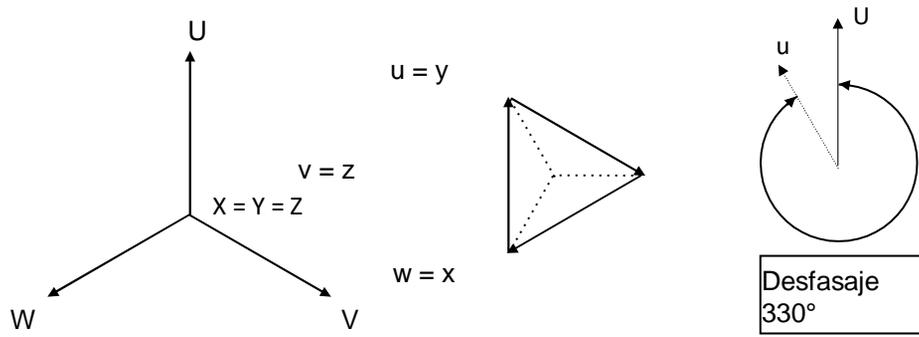


Figura 3.25 Conexión de los bobinados estrella en alta y triángulo en baja tensión



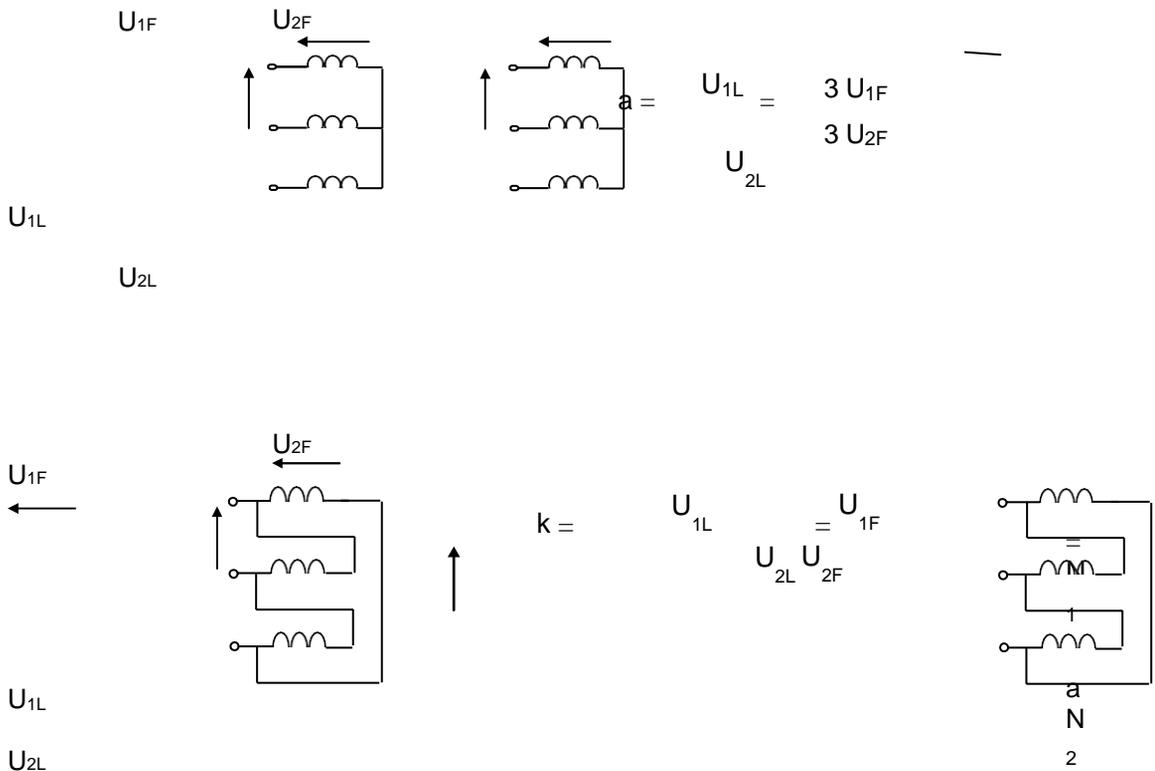
Grupo de conexión **Y d 11**

Figura 3.26 Diagramas fasoriales para conexión estrella triángulo

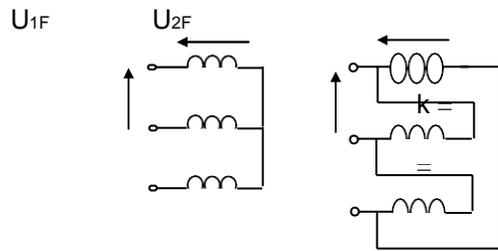
3.2.6 Relaciones de transformación

En los transformadores trifásicos la relación de transformación está determinada por la **relación entre la tensión primaria de línea y la tensión secundaria de línea**, cuando el transformador se encuentra en vacío.

Debido a esto la relación puede diferir de la relación entre espiras (Relación entre tensión de fase primaria y tensión de fase secundaria), dependiendo ello de cómo estén conectados los bobinados. En la figura 2.26 Se muestran los esquemas de conexiones y la relación de transformación.



U_{1L}
 U_{2L}



$$U_{1L} = 3 U_{1F} =$$
$$U_{2F}$$

U_{2L}

$$= \frac{3}{N_1}$$

$\sqrt{\quad}$

—

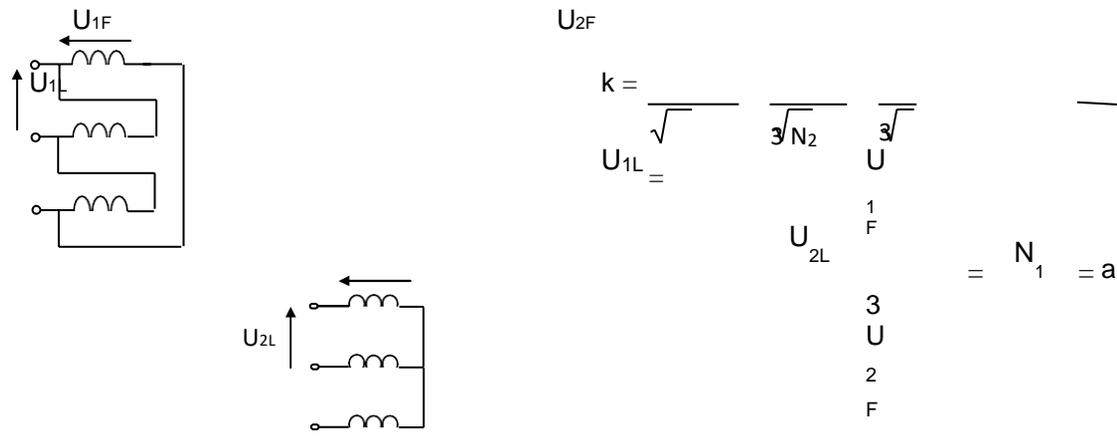


Figura 3.26 Relación de transformación para los diversos tipos de conexión de los bobinados

3.2.7 Flujo de potencias

Como el circuito equivalente que se realiza es para una fase del transformador, se debe tener en cuenta que la potencia en juego en dicho circuito representa la tercera parte de la del mismo. En la figura 3.27 se encuentra graficado el circuito equivalente y el flujo de potencia a través del mismo.

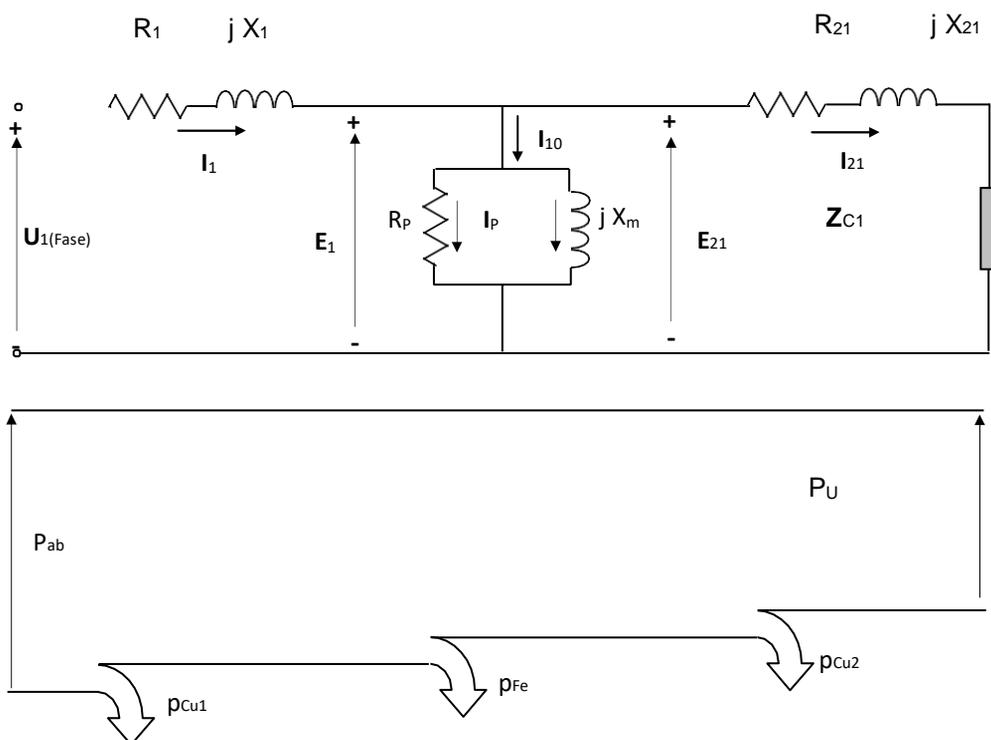


Figura 3.27 Flujo de potencia en un transformador

$$P_{\text{abs}} = 3 U_{1F} I_1 \cos \varphi_1 \quad p_{\text{Cu1}} = 3 R_1$$

$$I_1^2$$

$$p_{\text{Fe}} = 3 R_P I_P^2$$

$$p_{\text{Cu2}} = 3 R_{21} I_{21}^2$$

$$P_U = 3 U_{21} I_{21} \cos \varphi_2$$

3.3 Autotransformadores

El autotransformador es una bobina sobre un núcleo magnético, la cual tiene un punto intermedio, según se observa en la figura 3.28

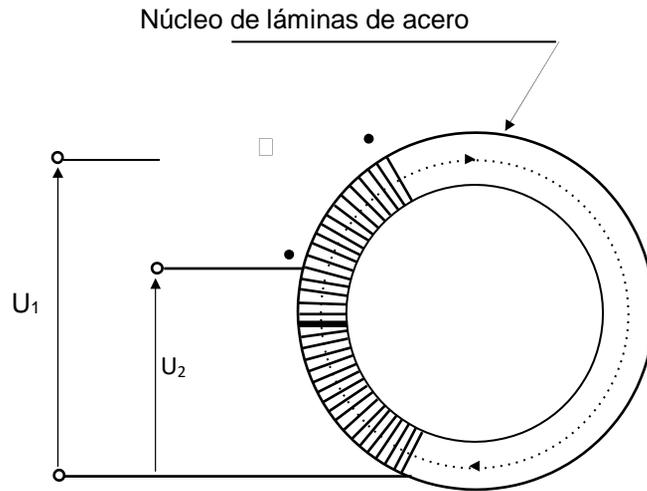


Figura 3.28 Esquema de un autotransformador

El autotransformador utiliza un solo bobinado por fase, por lo tanto se pierde el aislamiento eléctrico entre los circuitos primario y secundario.

Las ventajas que ofrece, con respecto a la utilización de dos bobinados, está en las menores pérdidas en el cobre, menor reactancia de dispersión y menor tamaño. Su uso se justifica cuando las tensiones primaria y secundaria tienen poca diferencia.

En el esquema de la figura 3.29, vemos un autotransformador reductor, al cual se le aplica una tensión primaria U_1 , que da origen a un flujo magnético que llamaremos Φ . Dado que este flujo es variable en el tiempo, se inducen fuerzas electromotrices cuyos valores son.

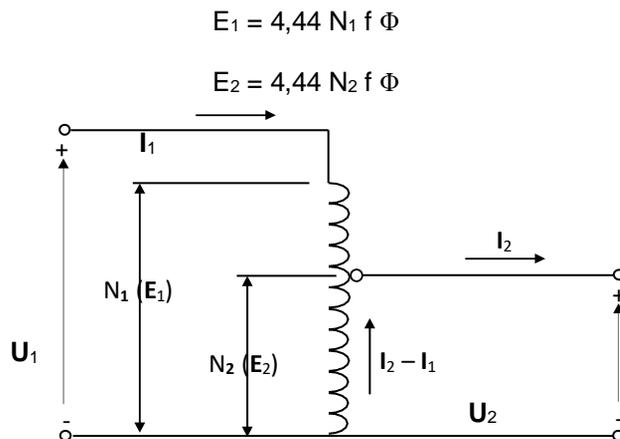


Figura 3.29 Esquema de un autotransformador reductor

Analizando el autotransformador ideal, se cumple:

$$U_1 = E_1 \text{ y } U_2 = E_2$$

Con lo cual nos queda:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a = \text{Relación de transformación.}$$

Si sumamos las fuerzas magnetomotrices en el núcleo magnético nos queda:

$$(N_1 - N_2) I_1 - N_2 (I_2 - I_1) = 0 \quad N_1 I_1 -$$

$$N_2 I_1 - N_2 I_2 + N_2 I_1 = 0$$

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = 0$$

Estos aparatos son también utilizados como autotransformadores variables, ya que haciendo que el punto intermedio pueda variar su posición mediante un contacto deslizante, podemos obtener una tensión de salida mayor o menor que la tensión de entrada según sea la necesidad, lo que puede observarse en la figura 3.30

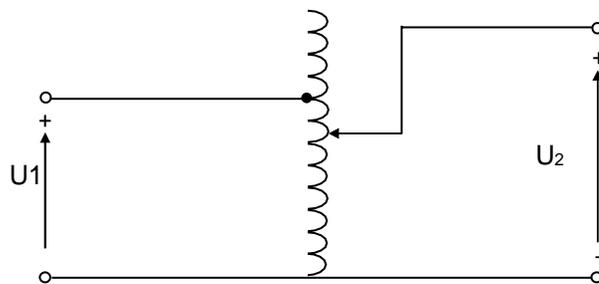


Figura 3.30 Esquema de un autotransformador variable

BIBLIOGRAFÍA

- [1] CHAPMAN. 2005. *Máquinas eléctricas*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- [2] CORTES. 1977. *Curso moderno de máquinas eléctricas rotativas. Tomo II: Máquinas de corriente continua*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados.
- [3] FAURE BENITO. 2000. *Máquinas y accionamientos eléctricos*. Madrid: Colegio oficial de ingenieros navales y oceánicos.
- [4] FITZGERALD, KINGSLEY Y UMANS. 2004. *Máquinas eléctricas*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- [5] FRAILE MORA, J. 2008. *Máquinas eléctricas*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- [6] IVANOV-SMOLENSKI. 1984. *Máquinas eléctricas. Tomo 3*. Moscú: Editorial Mir.
- [7] KOSTENKO y PIOTROVSKI. 1979. *Máquinas eléctricas. Tomo I*. Moscú: Editorial Mir.
- [8] LANGSDORF. 1968. *Principios de las máquinas de corriente continua*. Méjico: McGraw-Hill.
- [9] SANZ FEITO. 2002. *Máquinas eléctricas*. Madrid: Pearson Educación.
- [10] SERRANO IRIBARNEGARAY. 1989. *Fundamentos de máquinas eléctricas rotativas*. Barcelona: Marcombo Boixareu Editores.
- [11] IRWIN L. KOSOW. 2006. *Maquinas Eléctricas y transformadores Barcelona*: Editorial Reverte S.A.