



**ESCUELA
INDUSTRIAL
SUPERIOR**

PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA

UNIDAD TEMATICA II

MAQUINAS GENERADORAS DE ENERGIA ELECTRICA (ALTERNADORES)

- **GENERALIDADES.**

El alternador es una máquina eléctrica sincrónica. Las máquinas sincrónicas son convertidores electromecánicos rotativos que, girando a una velocidad constante proporcional a la frecuencia del sistema eléctrico, transforman la energía mecánica en energía eléctrica, bajo la forma de corrientes alternas, o viceversa.

Estas máquinas constan de un devanado de inducido y un devanado inductor concatenados por un campo magnético, caracterizándose por tener el arrollamiento inducido en el estator, alojándose en ranuras practicadas en la superficie cilíndrica interna del paquete magnético y el arrollamiento del inductor, alimentado por corriente continua en el rotor.

- **LEYES FUNDAMENTALES QUE RIGEN EL FUNCIONAMIENTO DE LAS MÁQUINAS ROTANTES.**

Dos principios físicos relacionados entre sí sirven de base al funcionamiento de los generadores y de los motores; además ambos principios se encuentran presentes en los dos tipos de máquinas cuando están en carga, con predominio de uno sobre otro.

- **LEY DE FARADAY MOCIONAL.**

Si un conductor de longitud (l) se mueve a través de un campo magnético (\mathbf{B}), a una velocidad (v), cortando sus líneas de fuerza, la f.e.m. (\mathbf{E}) que se induce en el mismo viene dada por:

$$E = v \cdot B \cdot L \quad (\text{II.1})$$

Donde se obtiene máxima eficacia cuando v es perpendicular a \mathbf{B} (en el sentido del triedro izquierdo).

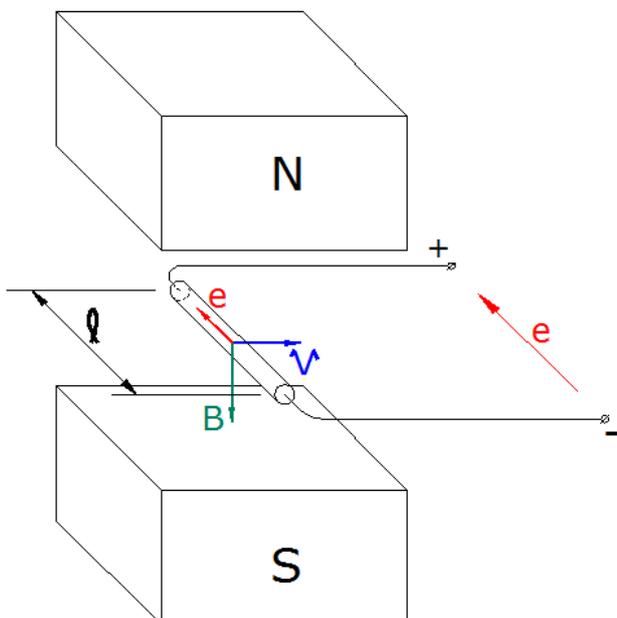


Figura II.1. Ley de Faraday Mocional

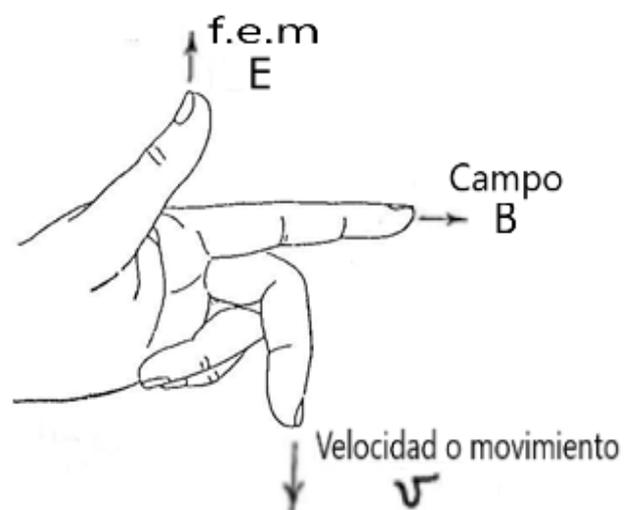


Figura II.2. Regla del triedro izquierdo (Mano izquierda)

LEY DE BIOT Y SAVART.

Esta ley establece que si una corriente (I) pasa a través de un conductor de longitud (l) dentro de un campo magnético (B), se ejerce una fuerza mecánica sobre el conductor que viene dada por la siguiente expresión: $F = I.B.L$ (II.2)

En el sentido del triedro derecho.

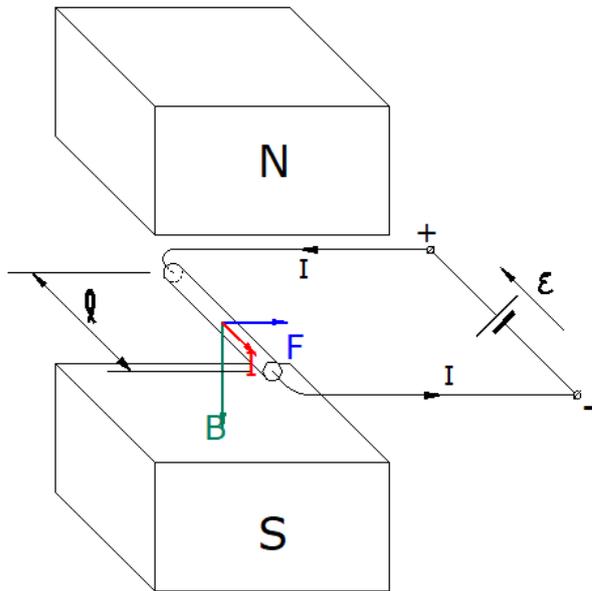


Figura II.3. Ley de Biot y Savart



Figura II.4. Regla del triedro derecho (mano derecha)

CARACTERÍSTICAS DEL ALTERNADOR.

Al alternador se le aplica una energía mecánica en forma de movimiento giratorio para obtener una tensión en sus bornes. Está constituido por un devanado inductor, alimentado por corriente continua y un devanado de inducido, donde se induce la f.e.m. alterna, ambos concatenados por un flujo magnético.

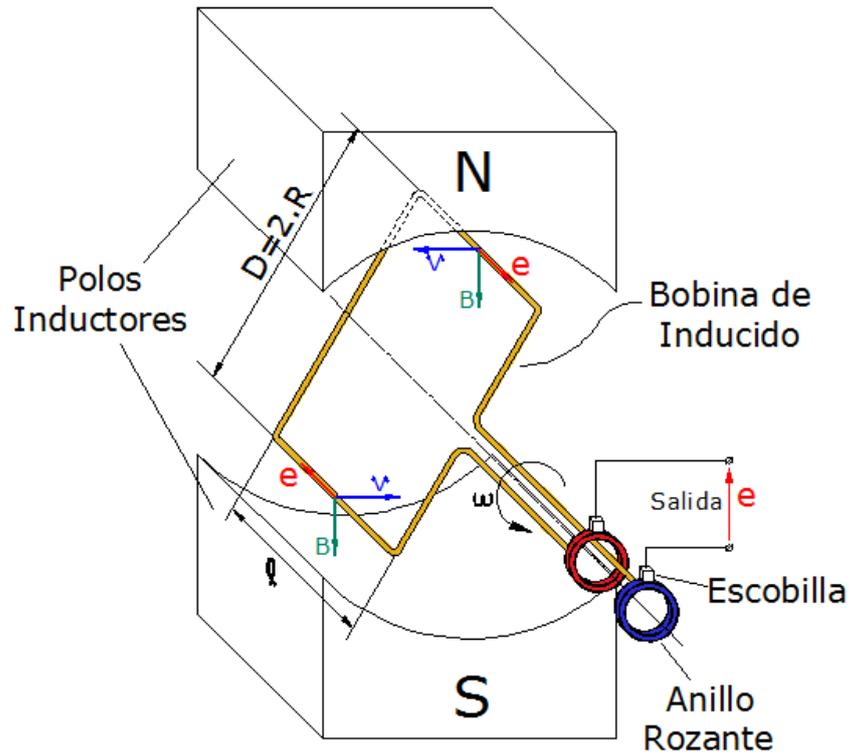
Es decir, al existir un movimiento relativo entre el inducido y campo magnético del inductor se induce en sus bobinados una f.e.m., que según la distribución de los arrollamientos, puede ser monofásica o trifásica.

• GENERACIÓN DE UNA F.E.M. POR MOVIMIENTO DE ROTACIÓN.

Consideremos un movimiento giratorio relativo, de velocidad angular ω , entre un campo magnético uniforme B y una bobina de N espiras. La figura II.5 muestra el movimiento de un conductor en un campo magnético estático (producido por un imán permanente). En este caso el inductor está fijo y el inducido móvil. De esta forma el flujo magnético concatenado por la bobina variará cosenoidalmente en sus diferentes posiciones al rotar.

Induciendo, como se verá más adelante, una tensión senoidal. En la máquina descrita, se induce tensión en todos los conductores en movimiento dentro del campo, pero solo es efectiva y se suman las que se inducen en los **conductores activos** de dimensión l , ya que en los de dimensión D , la tensión inducida resultante es nula.

Figura II.5. Movimiento del conductor en un campo estático (Alternador Elemental)



La figura II.6 presenta el caso de movimiento del campo magnético con un conductor estático. Este último caso es el que rige el funcionamiento del alternador y se caracteriza por poseer el inductor móvil y el inducido fijo.

El campo \mathbf{B} influirá en la bobina en forma variable, dependiendo esta variación de la posición relativa de la bobina durante el movimiento de rotación. De esta forma el flujo magnético en la bobina también estará dado por una función cosenoidal.

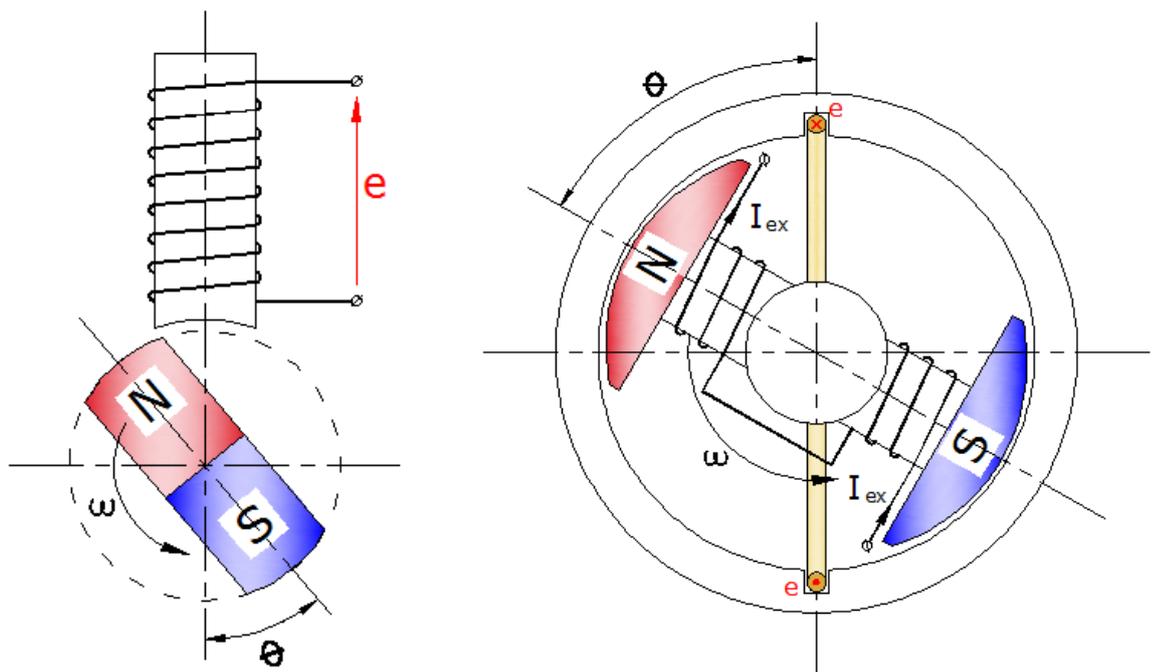


Figura II.6. Movimiento del campo magnético y conductor inducido estático.

En ambos casos se observa una alternancia de polaridad (cambio de polaridad), ya que al girar la bobina de inducido (en el 1^{er} caso) o el campo magnético inductor (en el 2^{do} caso), en cada giro o período de revolución, sus conductores activos cortan las líneas de campo magnético en direcciones opuestas induciendo tensiones en los conductores activos (a-b y c-d) de distinto sentido y como cada uno de ellos está solidario a un anillo rozante (a-b con I y c-d con II), en cada borne de salida conectado a una escobilla que hace contacto con el anillo rozante, cambiará la polaridad cada medio giro.

La tensión inducida entonces tendrá características de alternar de polaridad cada medio giro (Tensión Alterna), como se muestra en la figura II-7.

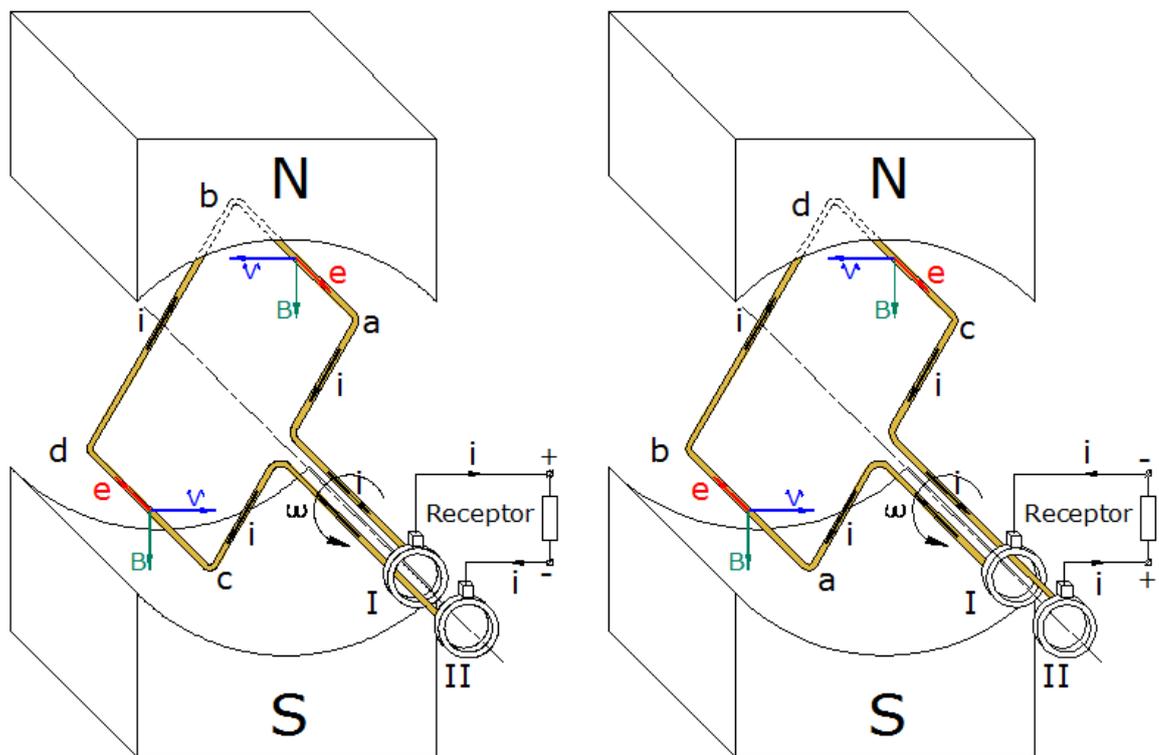


Figura II.7. Alternancia de la polaridad de la tensión inducida.

También en ambos casos el flujo magnético que atraviesa a la bobina de inducido varía según una función cosenoidal, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\varphi = \varphi_{max} \cdot \cos \theta = \varphi_{max} \cdot \cos (\omega \cdot t) \quad (II.3)$$

Esto es visible en las siguientes figuras, donde se observa según el primer caso (Inducido Móvil), la bobina de inducido en diferentes posiciones (ángulos θ respecto del semieje positivo x) atravesada por diferentes cantidades de líneas de inducción donde queda claro que el Flujo Magnético φ , que es el producto de la Inducción Magnética B por el Área A , es variable porque esta última varía y además lo hace según el Coseno del ángulo de desplazamiento θ .

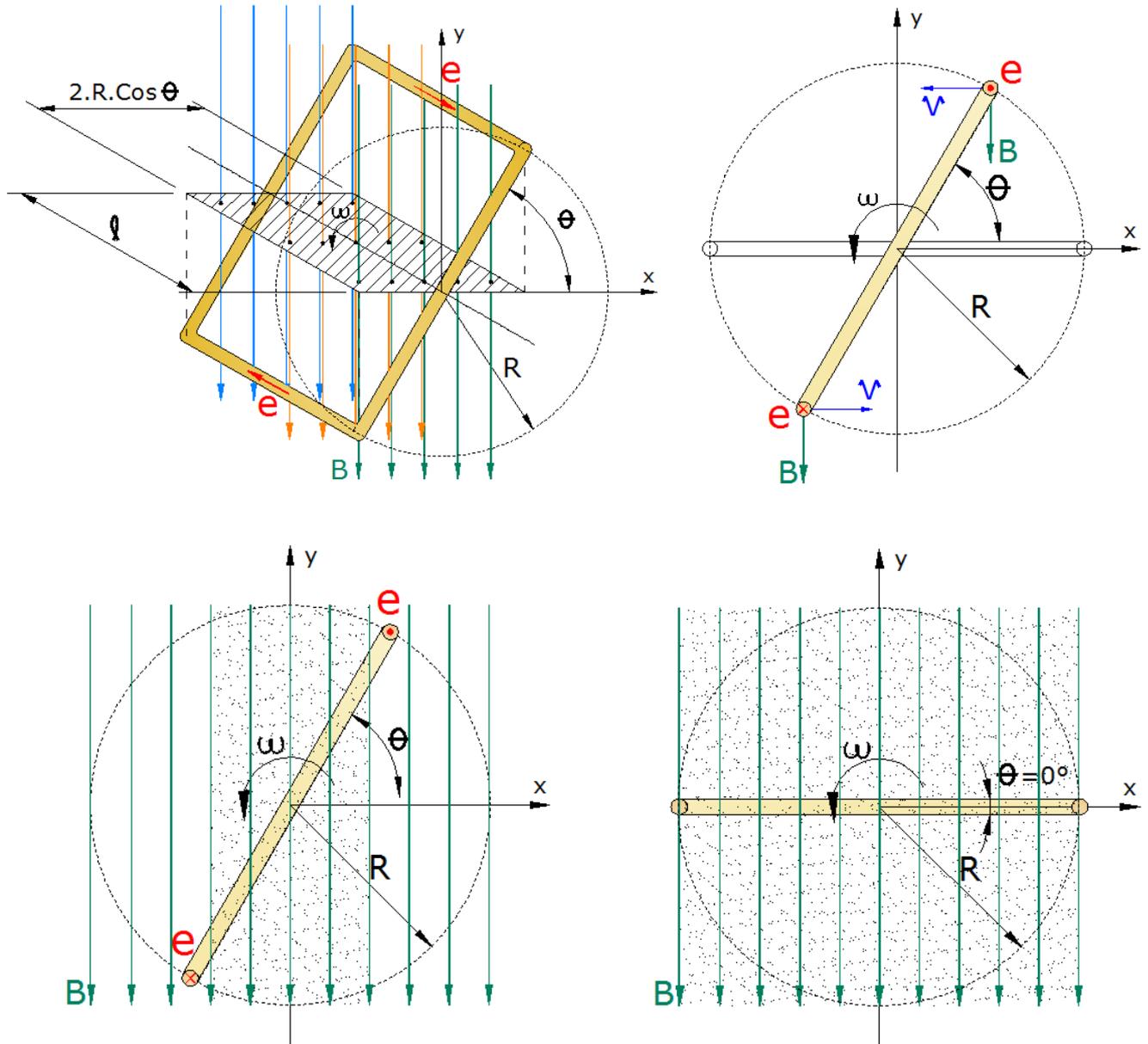


Figura II.8. Campo magnético concatenado y proyección del área.

Variación cosenoidal del área, considerada para el cálculo del flujo magnético:

$$A = l \cdot 2 \cdot R \cdot \cos\theta = A_{\max} \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (\text{II.4})$$

Flujo Magnético, donde **B** es constante: $\varphi = B \cdot A$ (II.5)

Finalmente el flujo magnético instantáneo queda expresado por:

$$\varphi = B \cdot l \cdot 2 \cdot R \cdot \cos\theta = B \cdot A_{\max} \cdot \cos(\omega \cdot t) = \varphi_{\max} \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (\text{II.6})$$

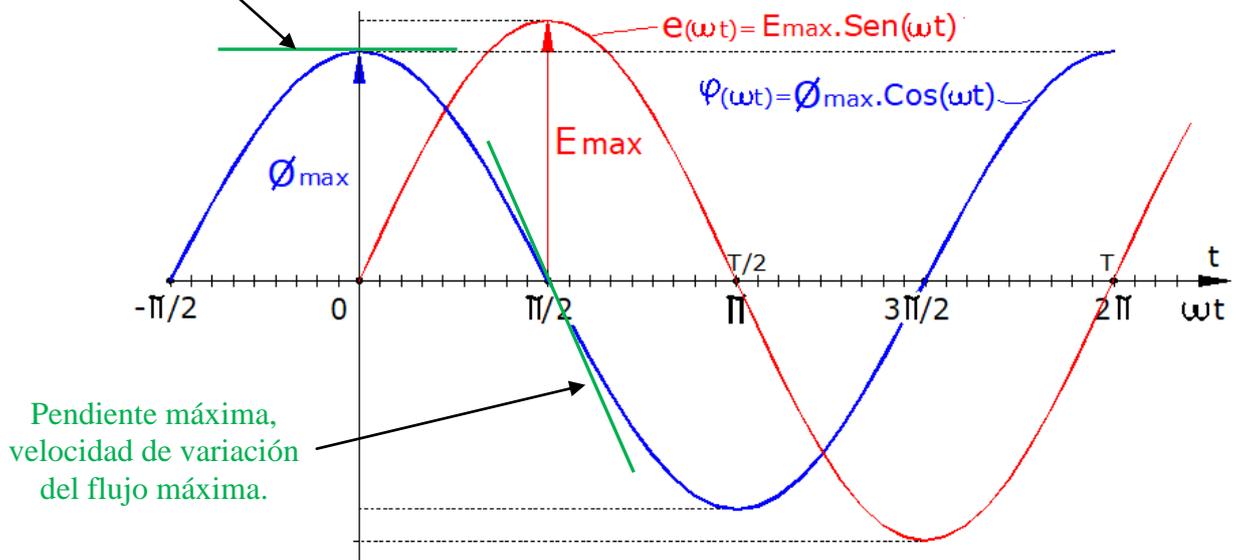
La f.e.m. inducida en la bobina se determina de acuerdo a la ley de Faraday:

$$e = -N \cdot \frac{d\varphi}{dt} = -N \cdot \frac{d(\varphi_{\max} \cdot \cos(\omega \cdot t))}{dt} = N \cdot \varphi_{\max} \cdot \omega \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$$

$$e = E_{\max} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \quad (\text{II.7})$$

Donde, la tensión inducida máxima es: $E_{\max} = \omega.N.\Phi_{\max}$ (II.8)

Pendiente nula, velocidad de variación del flujo 0.



y la tensión inducida eficaz es: $E = E_{\max} / \sqrt{2}$ y como $\omega = 2.\Pi.f$

$$E = \frac{2.\Pi}{\sqrt{2}} . f . N . \phi_{\max} = 4,44 . f . N . \phi_{\max} \quad (II.9)$$

Otra forma de análisis, es utilizar la ley mocional de Faraday, considerando que la tensión inducida en los conductores activos se suman N veces, tanto para los que pasan sobre el polo norte, como los que lo hacen por el polo sur.

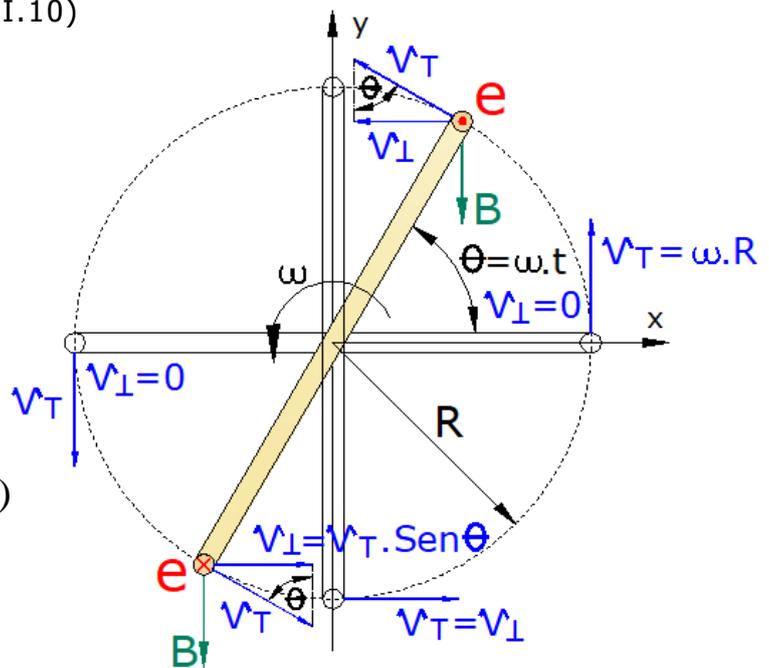
Entonces: $e = 2.B.l.v_{\perp}$ (II.10)

Donde v_{\perp} representa la componente de velocidad perpendicular al campo de inducción magnética **B**. Componente que resulta igual a la velocidad tangencial $v_T = \omega.R$ multiplicada por el **Sen (θ)**.

Entonces: $e = 2.B.l.\omega.R.Sen(\theta)$

Reordenando la expresión:
 $e = 2.R.l.B.\omega.N.Sen(\theta)$

Con $2.R.l.B = \phi_{\max}$



Obteniendo la misma expresión (II.7). **Figura II.9.** Variación de la velocidad perpendicular al campo.

JUSTIFICACIÓN DEL INDUCTOR MÓVIL.

A veces, es preferible generar un voltaje tan alto como sea posible, con objeto de reducir la corriente en los devanados de inducido. Las armaduras rotatorias no son prácticas en este tipo de aplicaciones, debido a que pueden producirse arcos (chispas) entre las escobillas y los anillos colectores, con elevadas tensiones y a que pueden producirse fallos mecánicos que podrían causar cortocircuitos. Además si la máquina es trifásica necesitaríamos cuatro contactos móviles. En cambio si las bobinas de inducido (armadura) se alojan en el estator y lo que gira es el campo, a lo sumo necesitamos dos contactos móviles, para alimentar con corriente continua los electroimanes polares que por otro lado se alimentan con una tensión menor (Baja tensión: 110 – 220 -440 [V]).

Otra ventaja de esta disposición es que la mayor parte de la potencia eléctrica se desarrolla en las bobinas de inducido y al estar estas alojadas en la corona estática; periferia de la máquina; se facilita la evacuación del calor, al ser mayor la superficie de disipación.

• PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.

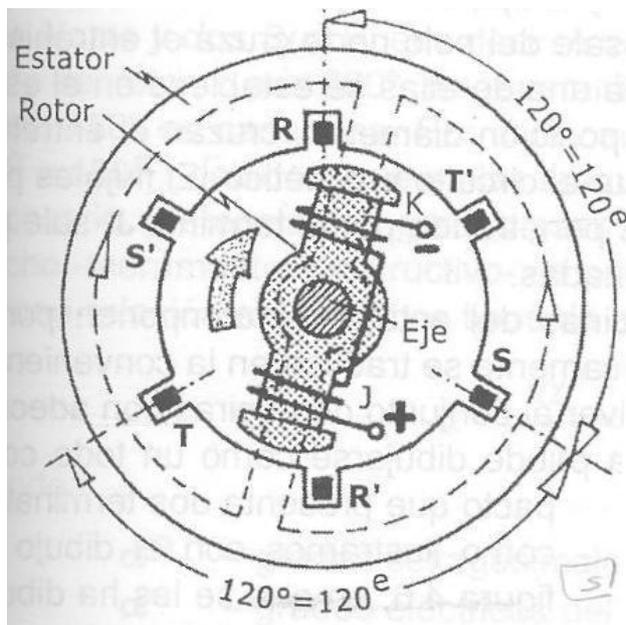


Figura II.10. Alternador trifásico

Partimos de la base de que si un conductor eléctrico corta las líneas de fuerza de un campo magnético, se origina en dicho conductor una corriente eléctrica. La generación de corriente trifásica tiene lugar en los alternadores, en relación con un movimiento giratorio. Según este principio, existen tres arrollamientos iguales independientes entre sí, dispuestos de modo que se encuentran desplazados entre sí 120° geométricos.

Según la ley motional de Faraday, al girar el rotor (imanes polares con devanado de excitación de corriente continua) se generan en los arrollamientos del inducido tensiones alternas senoidales desfasadas entre sí 120° en el tiempo. De esa forma tiene lugar un ciclo que se repite constantemente, produciendo la corriente alterna trifásica.

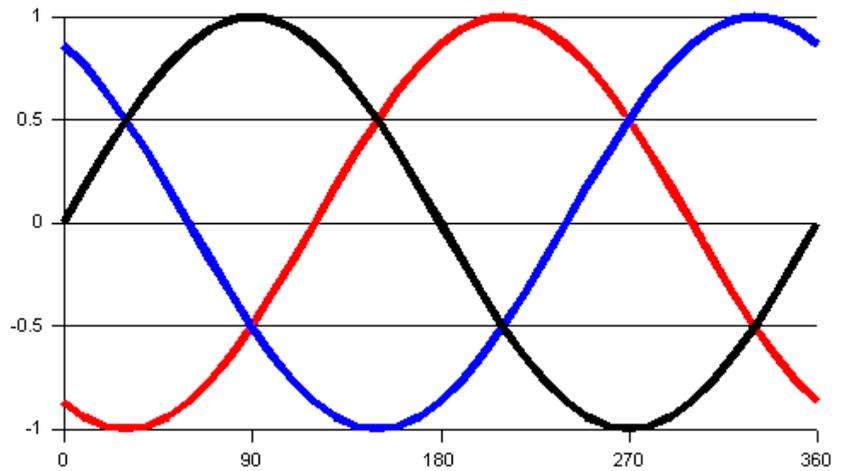
$$e_1 = E_{\max} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$$

$$e_2 = E_{\max} \cdot \text{sen}\left(\omega \cdot t - \frac{2}{3} \cdot \pi\right)$$

$$e_3 = E_{\max} \cdot \text{sen}\left(\omega \cdot t - \frac{4}{3} \cdot \pi\right)$$

(II.11)

Figura II.11. Ondas de Tensión



En la figura II.11, se observa que cuando una de las fases alcanza su máximo, la corriente en las otras dos está circulando en sentido opuesto y a la mitad de tensión. Dado que la duración de la corriente en cada imán es un tercio de la de un ciclo aislado, el campo magnético dará una vuelta completa por ciclo.

Aunque las tres corrientes son de igual frecuencia e intensidad, la suma de los valores instantáneos de las fuerzas electromotrices de las tres fases, es en cada momento igual a cero, lo mismo que la suma de los valores instantáneos de cada una de las fases.

- VELOCIDAD DE GIRO.

Al ser la corriente de excitación continua, y por ende, constante, la velocidad de giro de esta máquina solo puede ser la sincrónica, impuesta por la frecuencia (**f**) de las corrientes del inducido y por el número de pares de polos del inductor (**p**):

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad [\text{rpm}] \quad (\text{II.12})$$

- FUERZA ELECTROMOTRIZ INDUCIDA.

Al conectar las tres bobinas en estrella o en triángulo, tendremos un alternador trifásico. El valor eficaz de la f.e.m. inducida se expresa:

$$E = 4,44 \cdot N \cdot f \cdot k_b \cdot \phi_{\max} \quad (\text{II.13})$$

Φ_{\max} : Flujo máximo por polo.

N: número de conductores activos por fase.

E: fuerza electromotriz inducida por fase.

k_b : factor de bobinado (depende de las características constructivas del mismo).

Concluimos que la **E** en cada bobinado es función del número de conductores activos del bobinado, del flujo generado en el sistema inductor, de la frecuencia y del factor propio de la forma de construcción del bobinado.

Cabe mencionar que la conexión más utilizada en alternadores trifásicos es la conexión estrella.

• CLASIFICACIÓN.

Existen distintos tipos de clasificación para los alternadores.

- SEGÚN EL NÚMERO DE FASES DEL DEVANADO INDUCIDO.
 - Monofásicas.
 - Polifásicas.
- SEGÚN LA DISPOSICIÓN DEL EJE.
 - De eje vertical.
 - De eje horizontal.
- SEGÚN LA FORMA CONSTRUCTIVA DEL SISTEMA INDUCTOR.
 - **Máquinas de rotor de polos salientes.**

Son máquinas de baja velocidad (hasta 1000 [rpm]), que tienen una gran cantidad de pares de polos. Estos alternadores son generalmente arrastrados por turbinas hidráulicas o motores diesel.

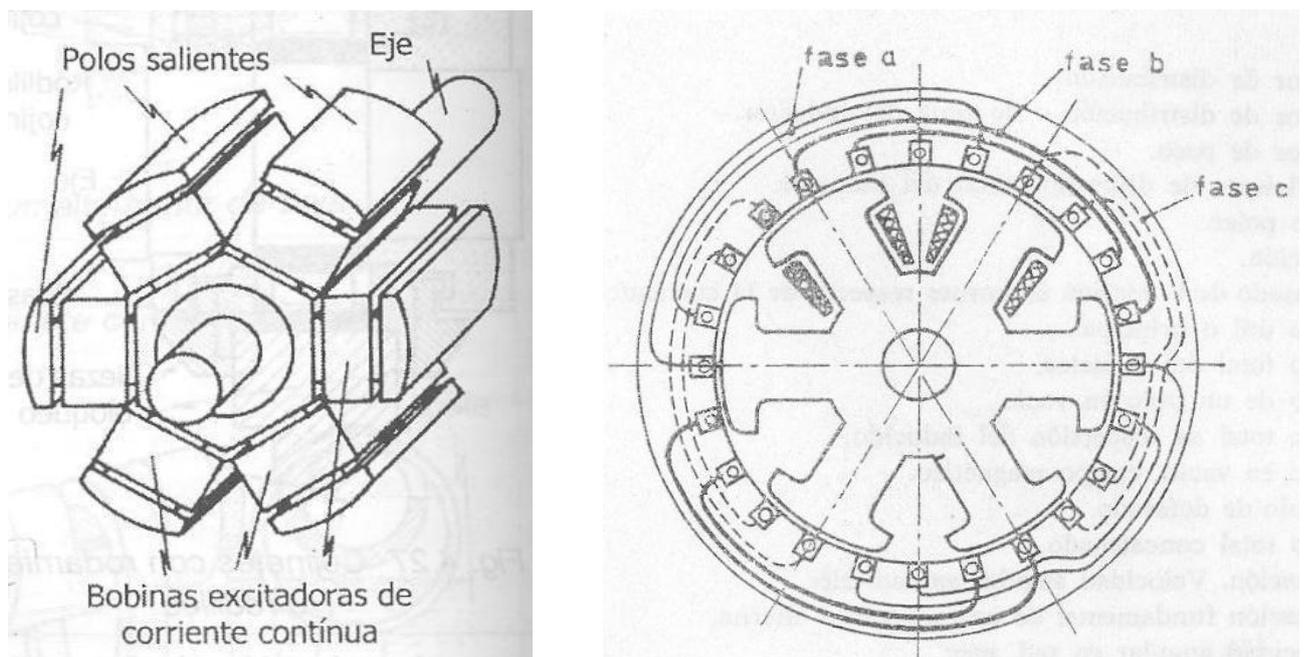


Figura II.12: Máquina síncrona de polos salientes

- **Máquinas con rotor liso o cilíndrico o liso.**

Se emplean exclusivamente en máquinas de alta velocidad y elevada potencia, siendo un motor de diámetro reducido en comparación con el rotor de polos salientes. Estos alternadores son arrastrados por turbinas de gas o vapor y tienen uno o a lo sumo dos pares de polos, siendo las velocidades de funcionamiento de 1500 o 3000 [rpm].

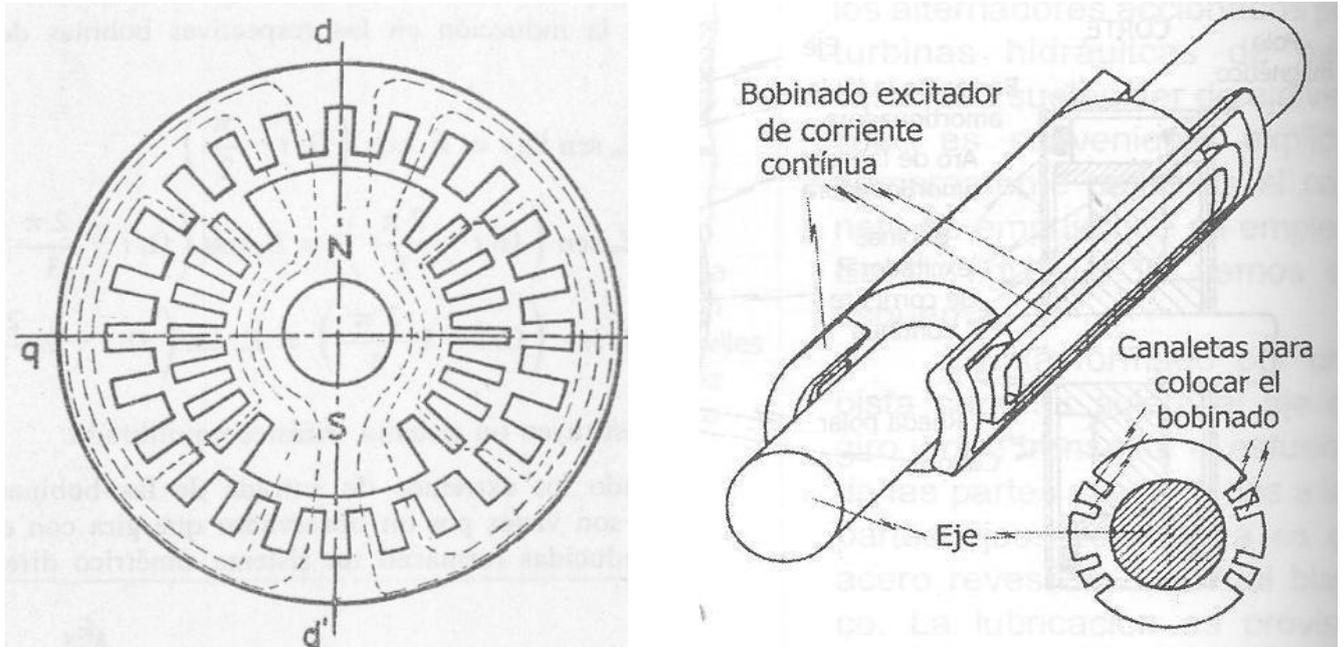


Figura II.13: Máquina síncrona de rotor cilíndrico o liso.

• **ASPECTOS CONSTRUCTIVOS.**

En la figura II.14 se muestran en forma esquemática algunas partes generales de la máquina síncronica

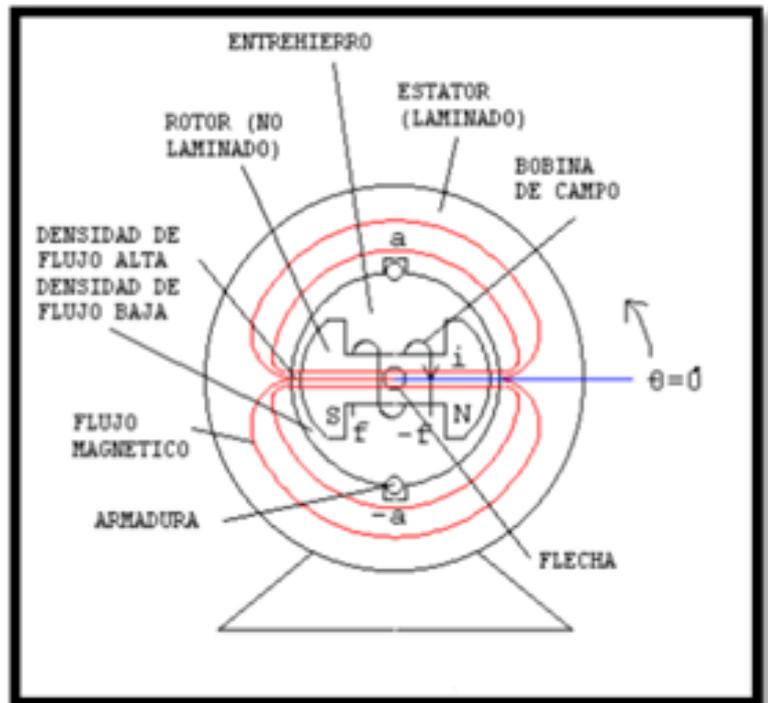


Figura II.14: Esquema de un alternador síncronico.

Las figuras II.15 muestran un corte longitudinal y otro transversal indicando todos los elementos que componen al alternador.

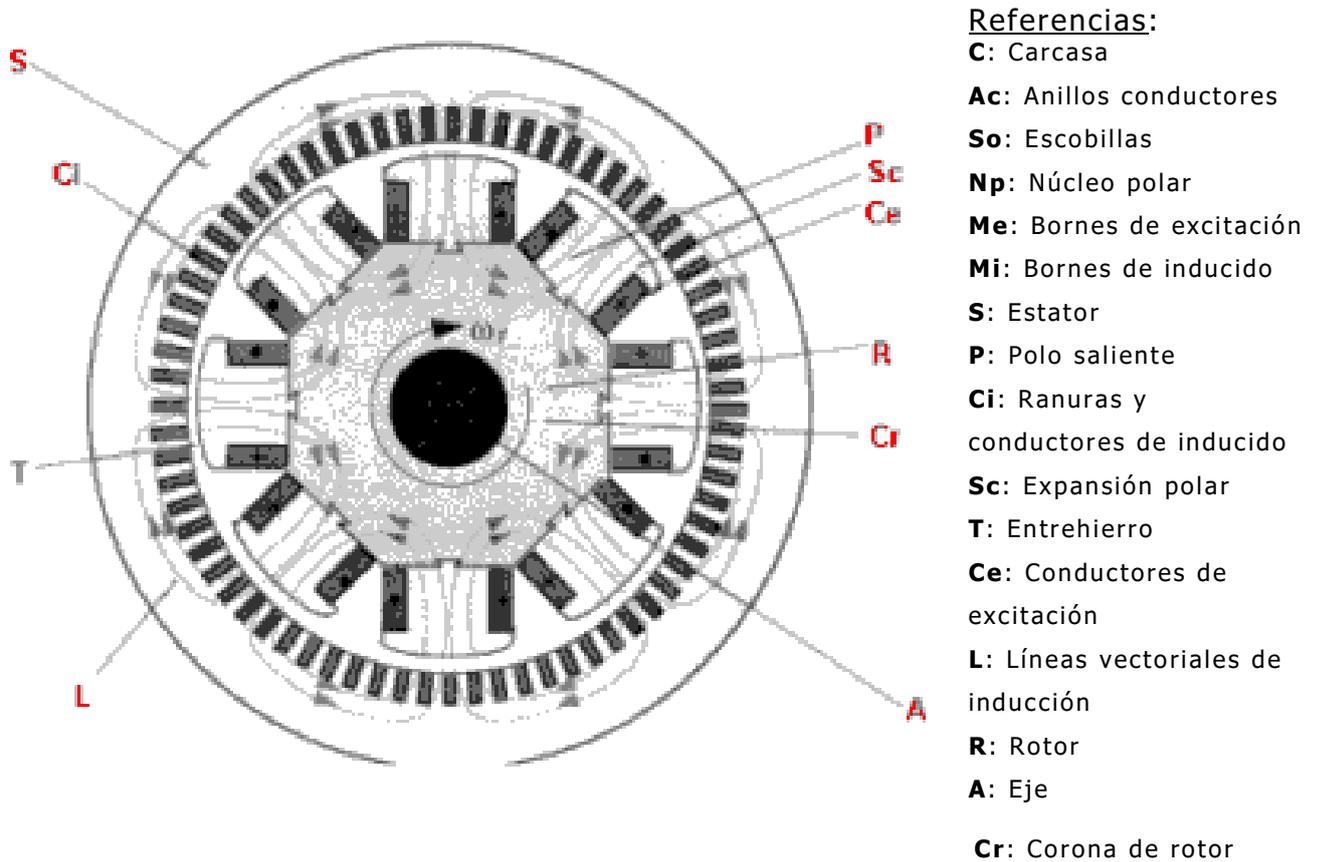


Figura II.15 (a): Máquina síncrona (sección transversal)

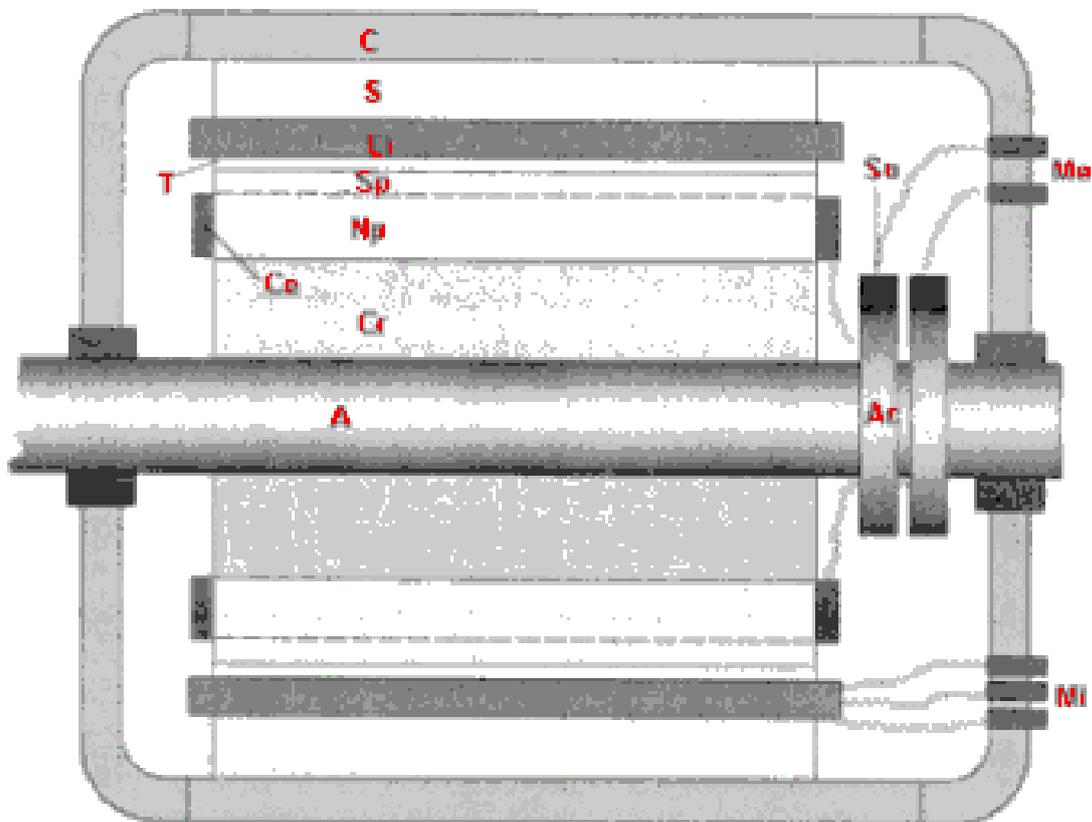


Figura II.15 (b): Máquina síncrona (sección longitudinal)

A continuación se describen las principales partes de la máquina síncrona.

- **ENTREHIERRO.**

El inductor provoca un campo magnético que alcanza al estator, atravesando el entrehierro, que es un espacio de aire existente entre el rotor y el estator. El Φ que sale del polo norte, cruza el entrehierro y se divide en dos partes iguales. Cada uno de los flujos parciales se establece en el estator y finalmente se encuentra en la posición diametral, cruzan el entrehierro opuesto y completan por el polo sur el circuito magnético.

Un mayor entrehierro (por lo tanto mayor reluctancia) exige una mayor fuerza magnetomotriz para obtener una inducción máxima determinada (ó flujo máximo), pero en cambio reduce la reactancia de dispersión del arrollamiento de inducido y por ende mejora la regulación de tensión y estabilidad de la máquina. Además, contribuye a la refrigeración de la máquina.

- **CIRCUITO MAGNÉTICO Y BOBINAS DEL INDUCIDO.**

Las bobinas del inducido se componen de una parte activa (que corta líneas de flujo), llamado lado de bobina y de una parte inactiva, ya que están fuera del alcance del flujo rotante, cuya misión es solo el empalme entre los lados activos alojados en las ranuras. En cuanto a su conexión, lo común es conectarlas en estrella. Tales ranuras son abiertas y de sección rectangular, siendo los conductores generalmente de sección cuadrada (pletinas).

- **CARCASA.**

En las figuras II.16 tenemos el paquete de chapas de hierro al silicio que componen el circuito magnético del estator, colocadas dentro de la carcasa y el bobinado de inducido (armadura) montado en las ranuras efectuadas en el paquete de chapas del estator.

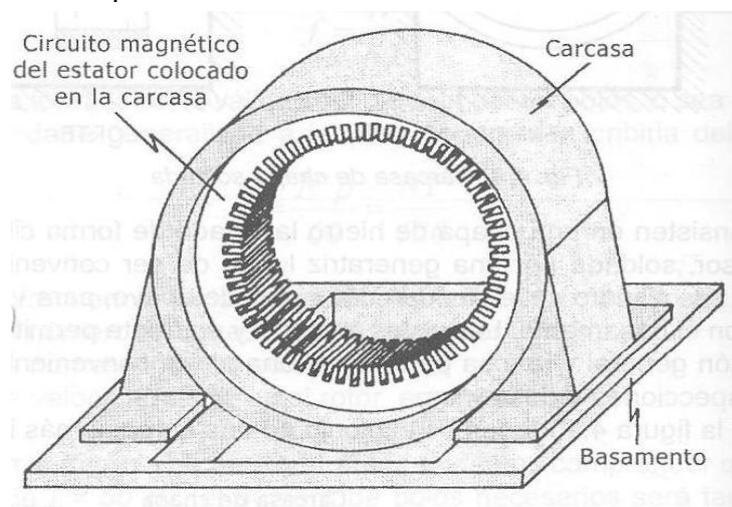


Figura II.16 (a). Carcasa con su paquete de chapas magnéticas.



Figura II.16 (b). Armadura.

- ROTOR.

Sujeto al eje está el cubo, que es la pieza central de colocación de los polos, los que están constituidos por un núcleo de acero al silicio o en algunos casos de acero macizo. En la parte exterior de cada polo está la expansión polar, que tiene por misión llevar a las líneas de campo magnético en forma adecuada al estator. Rodeando a los núcleos están las bobinas de corriente continua, que son las encargadas de generar el campo magnético inductor. La forma curvada de las expansiones responde a lograr que el flujo tenga una distribución lo más senoidal posible en el entrehierro.

En los turboalternadores las velocidades de giro son elevadas, por lo cual se alcanzan elevadas fuerzas centrífugas que no admiten la ejecución de polos salientes (más de 1500 [rpm]) y por ello es necesario utilizar el diseño de rotor liso, o rotor tipo tambor, el cual es un cilindro de acero de alta resistencia mecánica. En este, el eje es de acero y la pieza central es de chapas magnéticas como el estator. La corriente continua de excitación ingresa a las bobinas rotóricas a través de anillos rozantes, sujetos al eje a través de piezas aisladas.

Cuando una bobina se mueve dentro de un campo magnético permanente, paralelo y uniforme, la tensión inducida es senoidal, ya que depende directamente de la velocidad con que los conductores activos cortan al campo y esta velocidad de componente perpendicular al campo es igual a la velocidad tangencial (constante) por el seno de la posición angular de la bobina; ver figura II.18.

Con los fines de mejorar el circuito magnético (disminuir su reluctancia) para que exija la menor excitación magnética posible, debemos eliminar en el circuito del flujo magnético cuanto espacio de aire podamos.

Entonces se agrega en el rotor un tambor de acero a los fines que, el entrehierro sea mínimo.

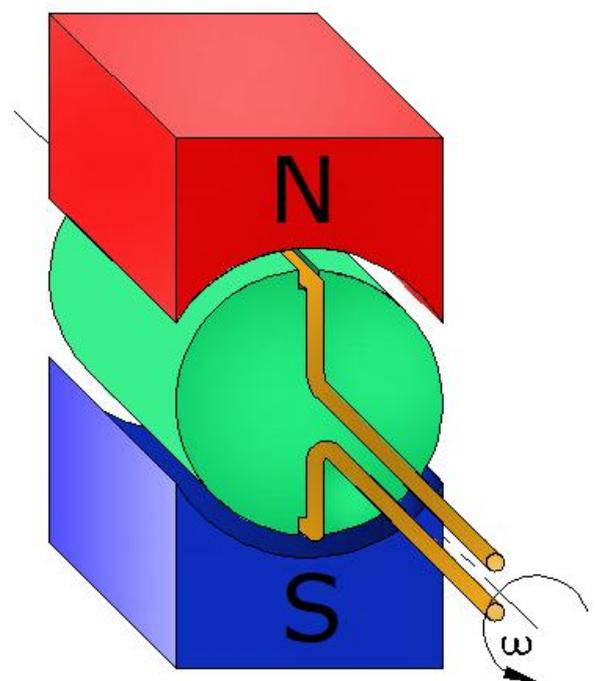


Figura II.17. Rotor con tambor de acero y entre-hierro mínimo.

Esto produce que los conductores activos se muevan en un campo, que en tal entre hierro, ahora es de distribución radial y la velocidad perpendicular pasa a ser igual a la velocidad tangencial y por ende constante mientras el conductor se mueve en la expansión polar; por este motivo la tensión inducida es entonces constante en el entre-hierro, dejando de ser senoidal, para ser ahora aproximadamente trapezoidal.

Figura II.18. Campo magnético de distribución radial en el entre-hierro, cuando se agrega un tambor cilíndrico de acero.

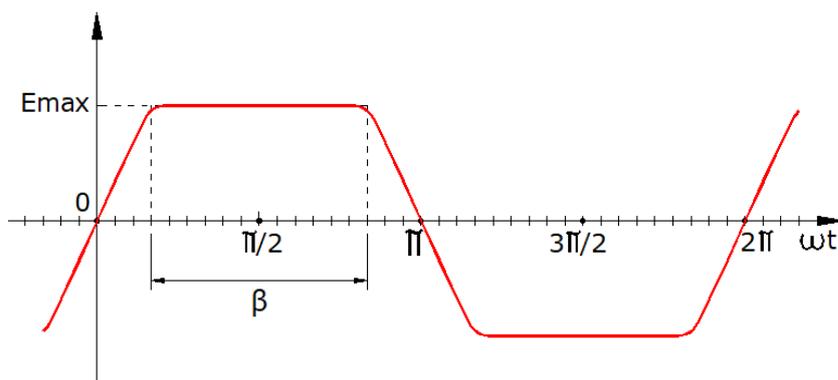
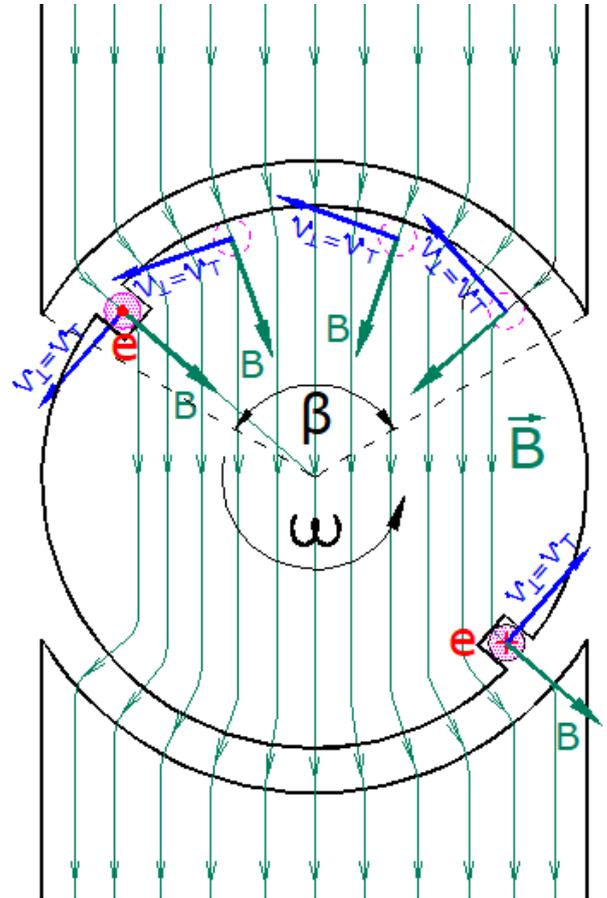


Figura II.19. Tensión inducida aproximadamente trapezoidal, como producto de un entre-hierro constante.

Para hacer que la tensión inducida vuelva a ser senoidal se rectifica la expansión polar de forma tal que el entre-hierro no sea constante; sea mínimo en el centro y sea máximo en el borde de la expansión polar.

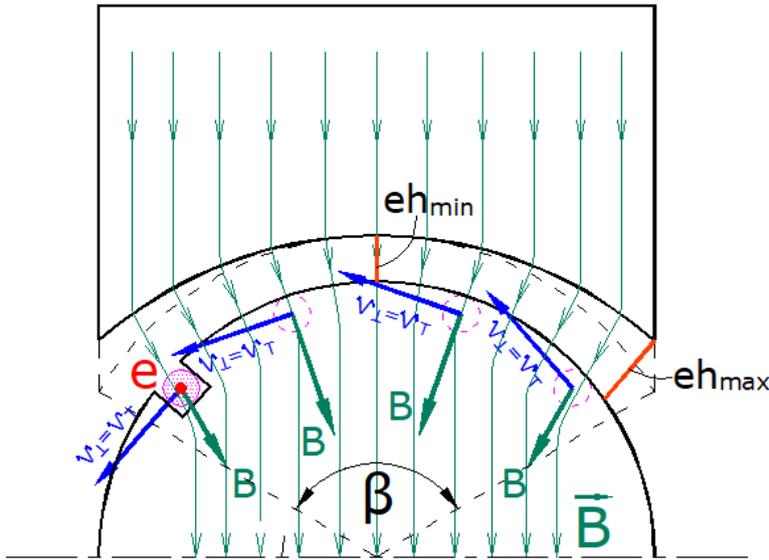


Figura II.20. Rectificación cosenoidal de la expansión polar.

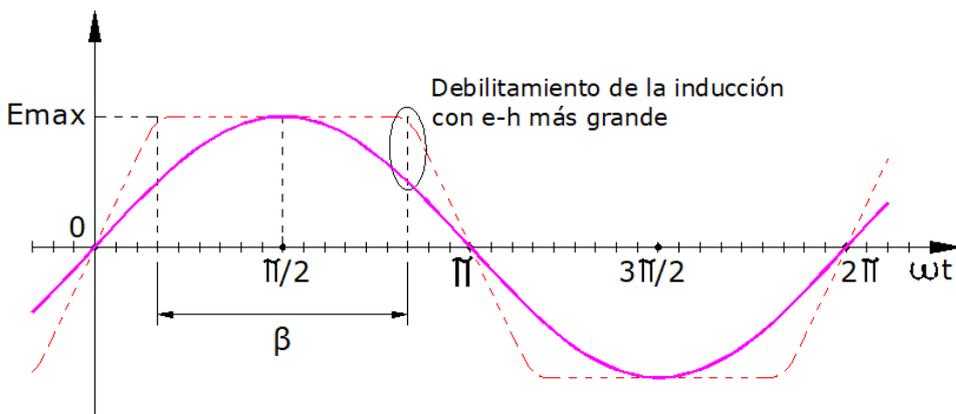


Figura II.21. Restitución de la tensión inducida senoidal.

Rectificar la expansión polar es posible solamente en las máquinas que admiten polos salientes. Pero si la máquina es de rotor liso, el entre-hierro es inevitablemente constante, ya que estas no tienen expansión polar.

En este tipo de rotores se logra que la tensión sea senoidal, mediante bobinas de campo en serie, con una distribución concéntrica de tal manera que estas generen por superposición, un campo magnético escalonado aproximadamente cosenoidal.

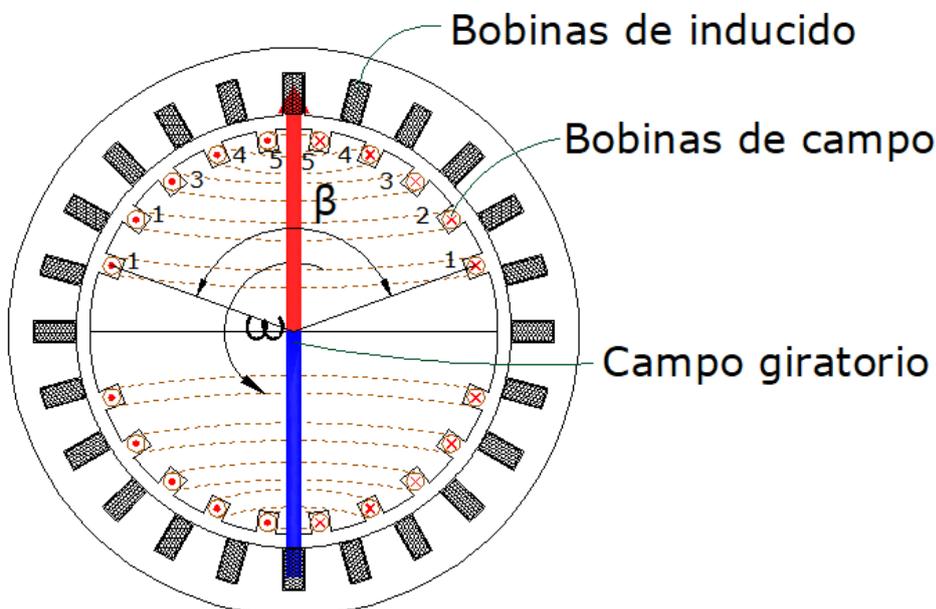


Figura II.22. Bobinas de campo distribuidas concéntricamente en el rotor.

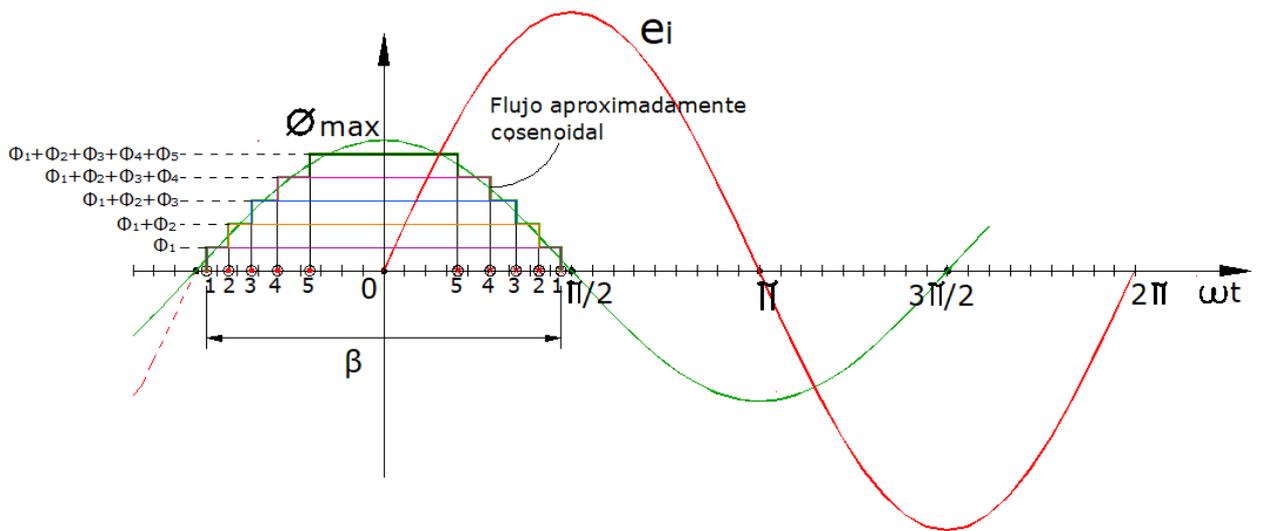


Figura II.23. Flujo magnético escalonado de aproximación senoidal.

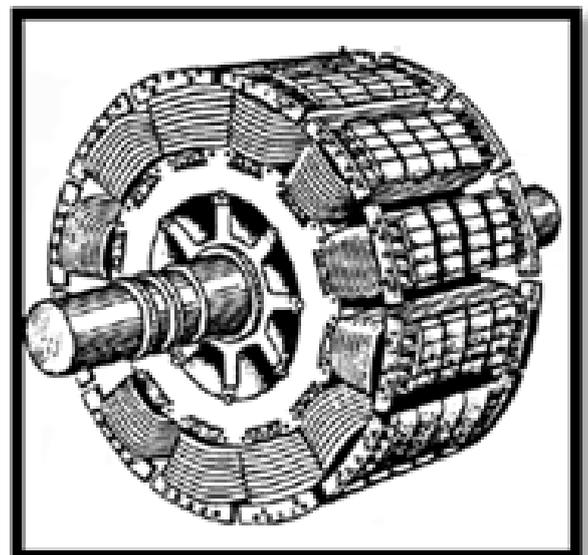
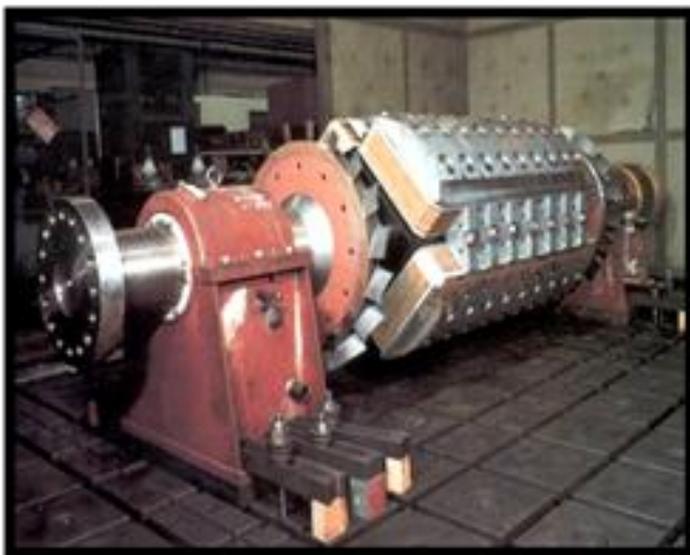
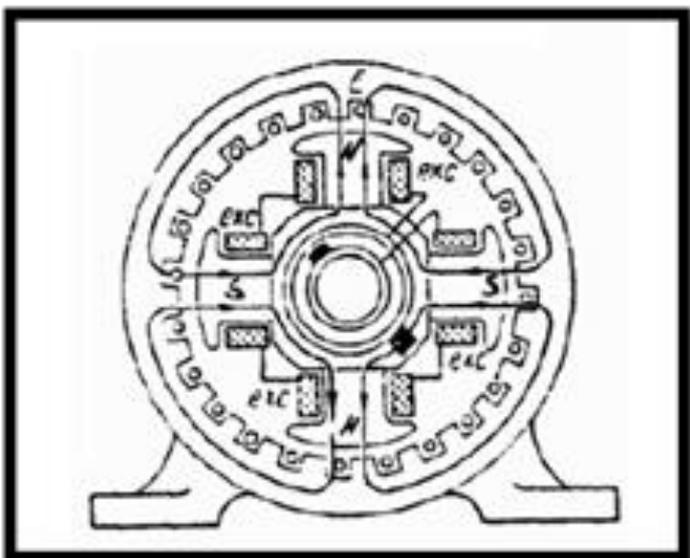


Figura II.24. Rotor de polos salientes



- **SISTEMA INDUCTOR.**

El conjunto de bobinas inductoras se conecta en serie y se alimenta con una fuente de corriente continua. Esta fuente puede estar constituida de varias formas. A continuación se describen las más utilizadas.

- **Mediante excitatriz electromecánica.**

La excitatriz es un generador de corriente continua, acoplado solidariamente al rotor del alternador, que alimenta mediante escobillas y anillos rozantes al sistema inductor del alternador.

Al comenzar a girar el conjunto, el magnetismo remanente en el núcleo de la excitatriz permite la generación de una f.e.m. que posteriormente alcanzará la tensión nominal requerida por el sistema inductor del alternador.

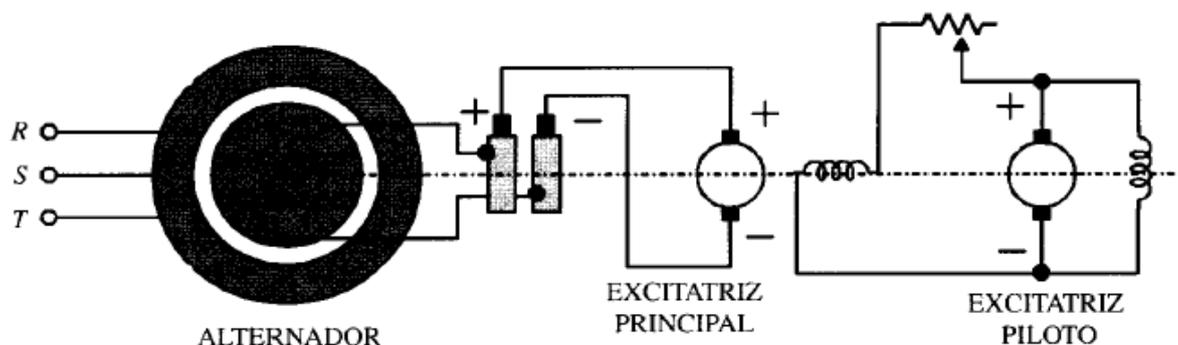


Figura II.25: Excitatriz electromecánica (con Dínamo)

- **Mediante excitatriz electrónica o estática.**

Debido a las dificultades de conmutación en las dínamos cuando éstas giran a grandes velocidades, y en general para evitar la presencia del colector de delgas de las mismas se utilizan excitatrices de corriente alterna que con la ayuda de rectificadores monofásicos, a través de escobillas y anillos rozantes, alimentado a su vez de un transformador que toma alimentación del propio alternador. En este caso el magnetismo remanente del alternador es el que permite que el alternador comience a generar.

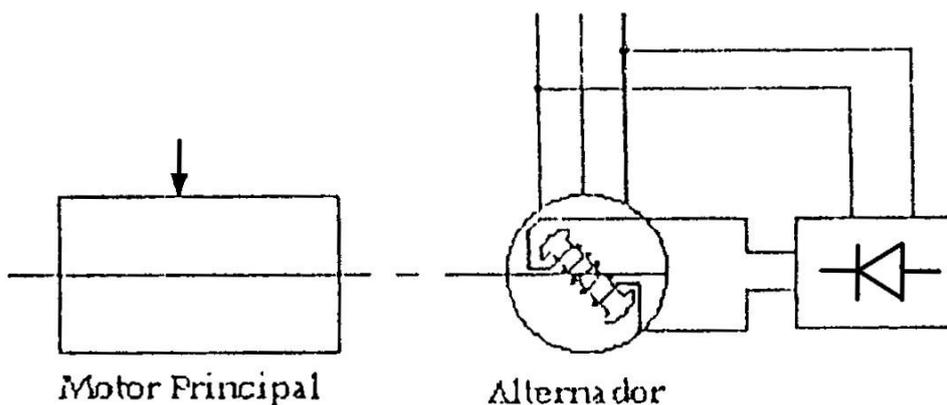


Figura II.26:
Excitatriz electrónica

▪ Alternador sin escobillas.

En ambos sistemas descriptos anteriormente, el sistema inductor se alimenta mediante escobillas y anillos rozantes, lo que requiere un mantenimiento y puesta a punto importante, además de las mayores pérdidas que se tiene por la resistencia de contacto entre escobillas y anillos.

El alternador sin escobillas se compone de un alternador principal, de inducido fijo y un alternador auxiliar de inducido móvil, que alimenta a un rectificador trifásico.

Tanto el inducido del alternador auxiliar como el puente rectificador giran solidarios con el sistema inductor del alternador principal, permitiendo la conexión directa, es decir, evitando las escobillas y los anillos rozantes. El sistema inductor del alternador auxiliar está alimentado mediante un rectificador controlado.

El magnetismo remanente presente en el núcleo de ambos sistemas inductores permitirá que el alternador principal comience a generar.

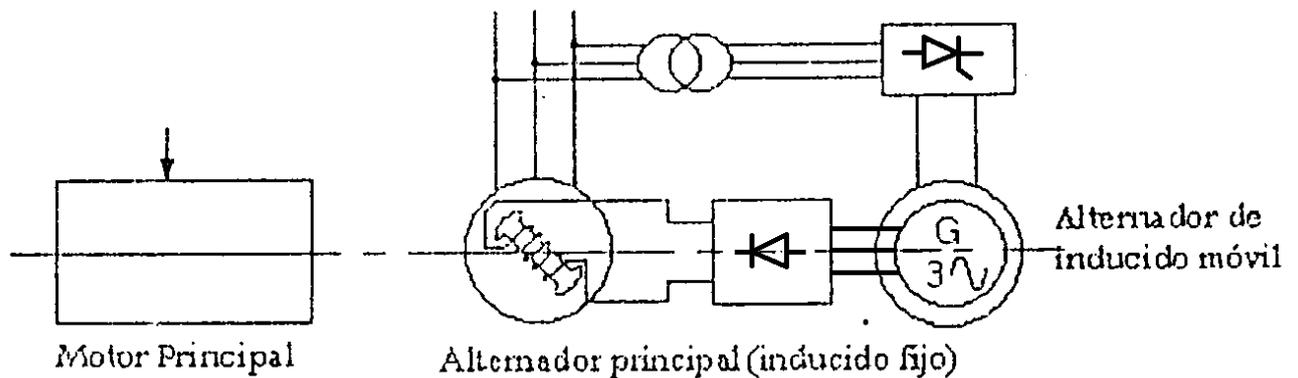
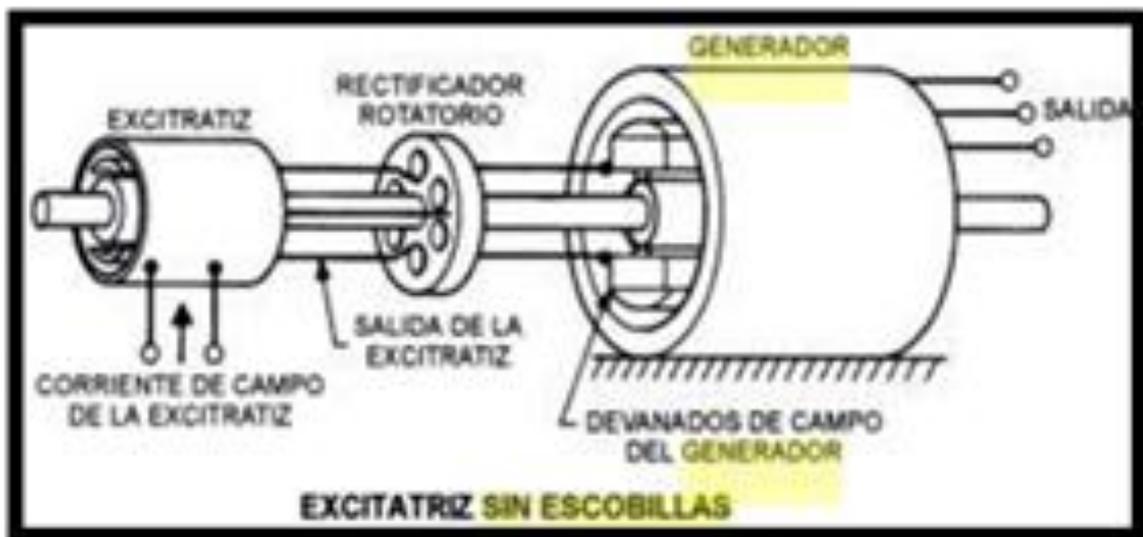


Figura II.27: Sistema inductor del alternador sin escobillas.



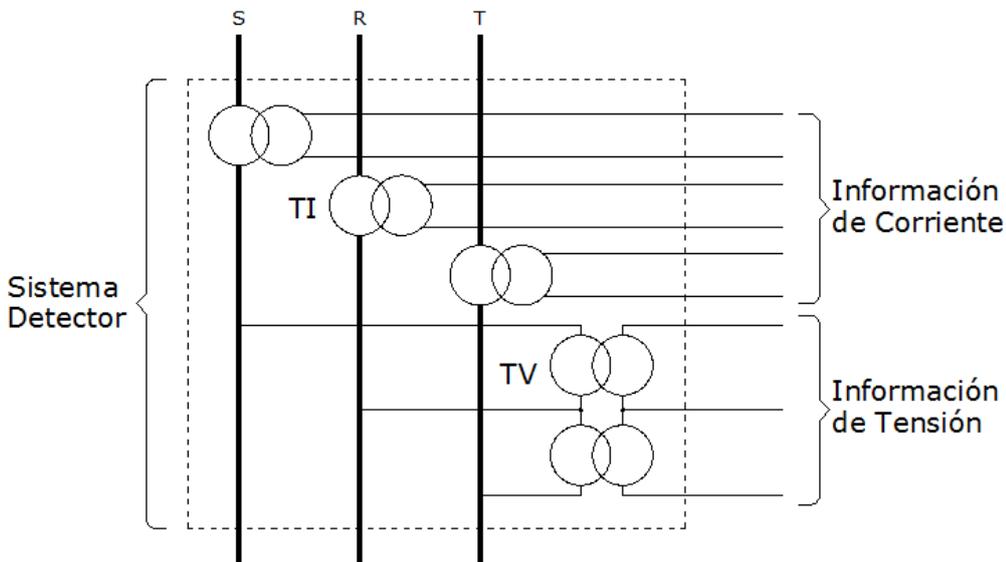
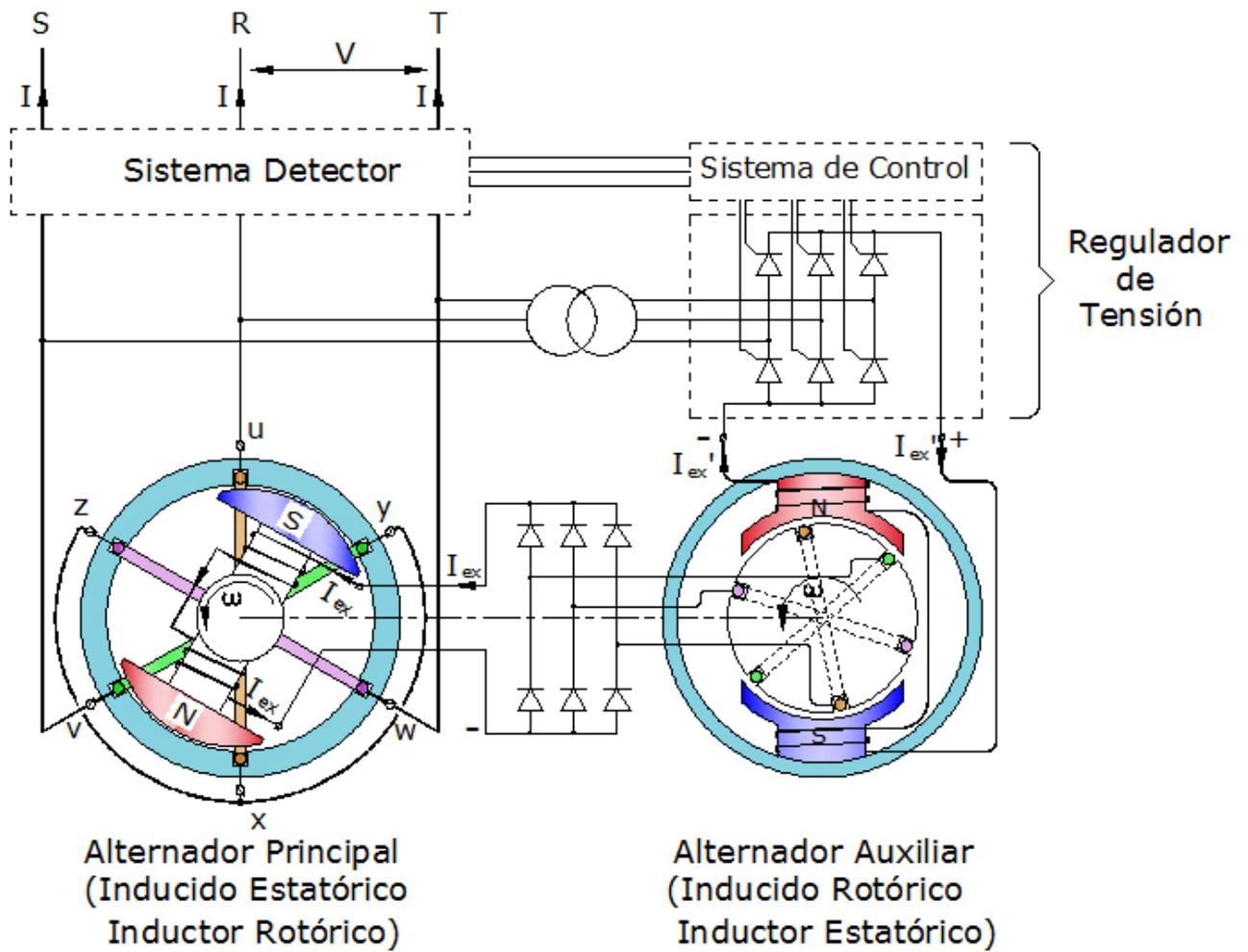


Figura II.28:
 Sistema detector de
 tensión y corriente.

• **TENSIÓN EN BORNES, CIRCUITO EQUIVALENTE Y DIAGRAMA FASORIAL.**

La tensión en bornes del generador se calcula como sigue:

$$U = E - I.Z_s = E - I.(R + jX_s) \approx E - I.X_s \quad (II.14)$$

Siendo Z_s la impedancia sincrónica de la máquina, la cual incluye a la resistencia efectiva R (o sea, a la corriente alterna) del arrollamiento inducido y la reactancia sincrónica X_s . Esta última contempla el flujo de dispersión de los bobinados y el flujo de dispersión del entrehierro en el paso del flujo inductor desde el rotor hacia el estator. Para grandes máquinas, R resulta de un valor pequeño en comparación con X_s y a los efectos de cálculo de la caída de tensión de la máquina, puede ser ignorada, con lo cual la reactancia sincrónica resulta ser aproximadamente igual a la impedancia sincrónica.

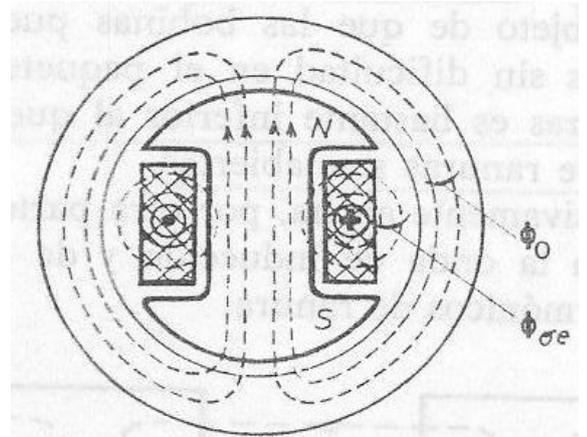


Figura II.29: Flujo útil y de dispersión del inductor

El circuito equivalente y el diagrama fasorial del generador son los siguientes:

Figura II.30: Circuito equivalente, por fase.

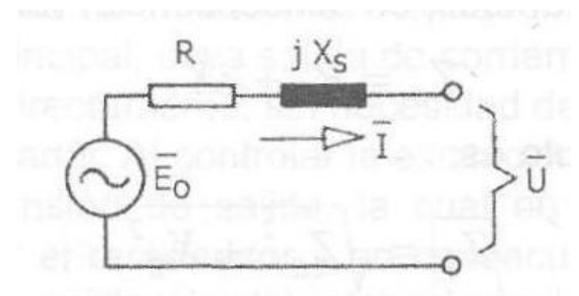


Diagrama fasorial con carga inductiva

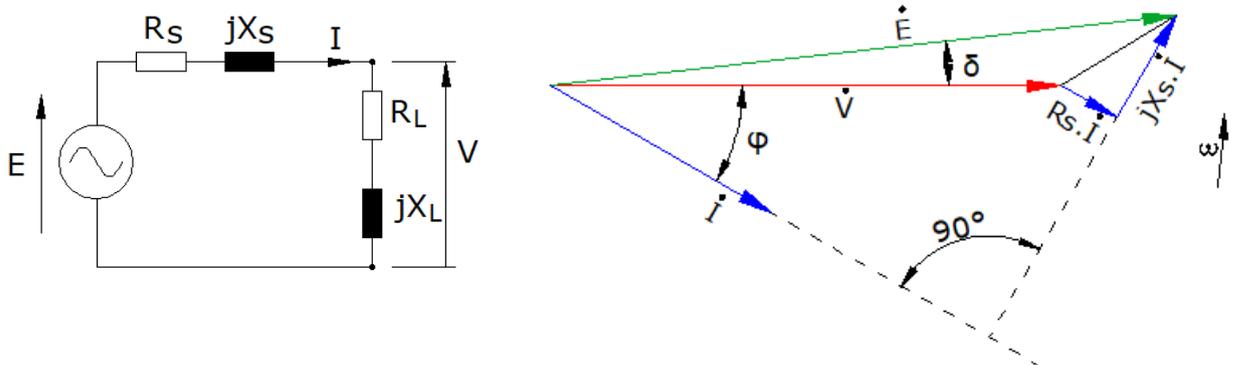


Figura II.31: Diagrama fasorial completo para carga inductiva.

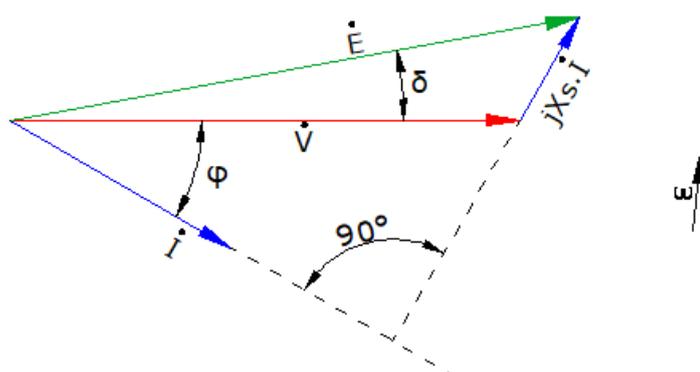


Figura II.32: Diagrama fasorial simplificado ($R_s=0$)

Diagrama fasorial con carga Capacitiva

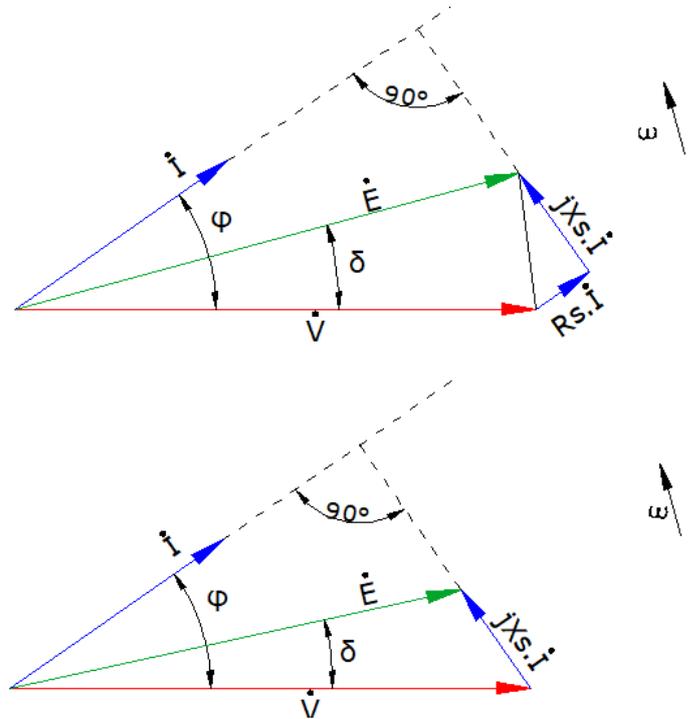
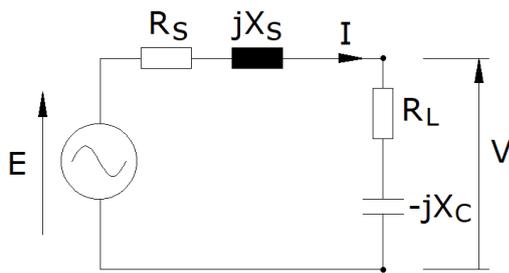


Figura II.33: Diagrama fasorial Completo y simplificado con carga capacitiva.

• **POTENCIA ELÉCTRICA INTERNA DE LA MÁQUINA SÍNCRONA.**

• MÁQUINA DE ROTOR LISO.

Siendo la expresión general de la potencia activa trifásica de un sistema trifásico la siguiente: $P = 3.U.I.\cos\varphi$ (II.15)

U: Tensión de fase.

I: Corriente de fase.

φ: Ángulo de desfase entre la U e I.

Según se definió anteriormente, la f.e.m. de vacío de la máquina será:

$$\dot{E} = \dot{U} + \dot{I} \cdot \dot{Z}_s \quad (II.16)$$

Definiendo en los diagramas fasoriales de las figuras II.21 y II.23 a la diferencia de fase entre la tensión de salida **U** y la fem **E**, como el Ángulo de Potencia **δ**
De la cual despejamos la corriente:

$$\dot{I} = (\dot{E} - \dot{U}) / \dot{Z}_s \Rightarrow \dot{I} = \frac{E \angle \delta - U \angle 0^\circ}{R_s + jX_s} = \frac{E \cdot \cos\delta + jE \cdot \text{Sen}\delta - U}{R_s + jX_s}$$

Racionalizando:
$$\dot{I} = \frac{(E \cdot \cos\delta + jE \cdot \text{Sen}\delta - U) \cdot (R_s - jX_s)}{(R_s + jX_s) \cdot (R_s - jX_s)}$$

$$\dot{I} = \frac{R_s \cdot E \cdot \cos\delta + jR_s \cdot E \cdot \text{Sen}\delta - R_s \cdot U - jX_s \cdot E \cdot \cos\delta + X_s \cdot E \cdot \text{Sen}\delta + jX_s \cdot U}{R_s^2 + X_s^2}$$

Reordenando componentes reales e imaginarias:

$$\dot{I} = \frac{(R_s.E.\cos\delta + X_s.E.\text{Sen}\delta - R_s.U) + j(R_s.E.\text{Sen}\delta - X_s.E.\cos\delta + X_s.U)}{R_s^2 + X_s^2}$$

La potencia aparente en una fase será: $\dot{S} = \dot{U} \cdot \dot{I}$

$$\dot{S} = U \cdot \frac{(R_s.E.\cos\delta + X_s.E.\text{Sen}\delta - R_s.U) + j(R_s.E.\text{Sen}\delta - X_s.E.\cos\delta + X_s.U)}{R_s^2 + X_s^2}$$

$$\dot{S} = \frac{R_s.U.E.\cos\delta + X_s.U.E.\text{Sen}\delta - R_s.U^2}{R_s^2 + X_s^2} + j \frac{R_s.U.E.\text{Sen}\delta - X_s.U.E.\cos\delta + X_s.U^2}{R_s^2 + X_s^2}$$

En esta expresión la componente real representa la potencia activa de una fase y la componente imaginaria la potencia reactiva.

Si consideramos que en las máquinas de potencia la resistencia R_s es despreciable frente a la X_s . Entonces para $R_s \rightarrow 0$:

$$P = \frac{0.U.E.\cos\delta + X_s.U.E.\text{Sen}\delta - 0.U^2}{0^2 + X_s^2} = \frac{X_s.U.E.\text{Sen}\delta}{X_s^2}$$

$$P = \frac{U.E}{X_s} \cdot \text{Sen}\delta \quad (\text{II.17})$$

Donde: $U.E/X_s$ representa la potencia máxima, entonces: $P = P_{\max} \cdot \text{Sen}\delta$ (II.18)

Realizando un análisis semejante para la potencia reactiva concluimos en que:

$$Q = \frac{U.E}{X_s} \cdot \text{Sen}\delta - \frac{U^2}{X_s} \quad (\text{II.19})$$

En función a dicha expresión se obtiene la curva de trabajo estable de la máquina sincrónica de rotor liso o cilíndrico, tal como se muestra en la figura II.25. A partir de la expresión (II.17) que expresa la potencia activa de una fase.

$$\dot{S} = \left[\frac{U.E.\text{Sen}\delta}{X_s} \right] + j \left[\frac{U.E.\cos\delta - U^2}{X_s} \right]$$

(II.20)

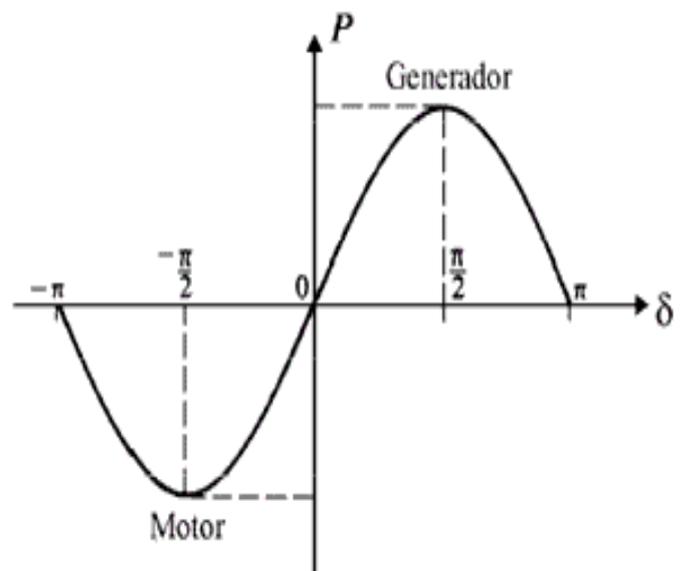


Figura II.34. Curva de trabajo de la máquina sincrónica

En el caso del motor, el ángulo δ es negativo, y cuando se incrementa la cupla de freno (la carga mecánica acoplada a su eje), el δ aumenta y la máquina incrementa su cupla motora para responder a la demanda hasta llegar al punto de cupla máxima en -90° . Si se sobrepasa ese punto, exigiendo más cupla al motor, el ángulo aumenta, pero la cupla decrece, al igual que la potencia, lo cual motiva una disminución de la velocidad del motor, perdiéndose el sincronismo (los polos reales del rotor se "desenganchan" de los polos virtuales del estator) y el motor se detiene.

Por ello, para ambos tipos de funcionamiento de la máquina sincrónica (motor o generador), los puntos $+90^\circ$ y -90° son los límites de estabilidad. Para cada tipo de funcionamiento en particular, los intervalos estables de funcionamiento son los siguientes:

- Motor: $-90^\circ < \delta < 0^\circ$.
- Generador: $0^\circ < \delta < 90^\circ$.

• MÁQUINA DE ROTOR DE POLOS SALIENTES.

La expresión final de cálculo obtenida de la potencia activa para la máquina de rotor de polos salientes, es algo diferente a la obtenida para la máquina de rotor liso debido a que intervienen dos reactancias como consecuencia de la asimetría del rotor (lo cual no ocurre en la de rotor liso que es simétrico). Por ello las reactancias que intervienen en el cálculo de la potencia eléctrica de la máquina son las siguientes:

- Reactancia de eje directo o eje polar (\mathbf{X}_d), generalmente igual a la \mathbf{X}_s .
- Reactancia de eje en cuadratura (\mathbf{X}_q), la cual determina un incremento de potencia de la máquina de polos salientes respecto a la de rotor lisos debido al par de reluctancia generado por la misma (esta potencia introduce el efecto de los polos salientes y representa el hecho físico de que la onda de flujo en el entrehierro produce un par que tiende a alinear los polos en la posición de mínima reluctancia, o sea, mínimo entrehierro).

$$P = \left[\frac{U \cdot E}{X_d} \cdot \text{Sen} \delta + \frac{U^2}{X_d \cdot X_q} \cdot (X_d - X_q) \cdot \text{Sen} \delta \cdot \text{Cos} \delta \right] \text{ ó}$$

$$P = \left[\frac{U \cdot E}{X_d} \cdot \text{Sen} \delta + \frac{U^2}{2 \cdot X_d \cdot X_q} \cdot (X_d - X_q) \cdot \text{Sen}(2\delta) \right] \quad (\text{II.21})$$

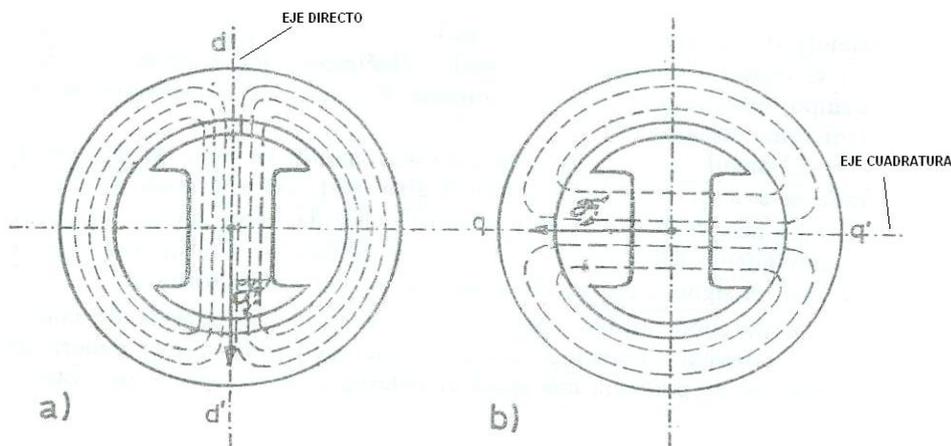


Figura II.35: Variación de la reluctancia del circuito magnético del campo excitado por el inducido: a) Reluctancia mínima (F_{MM} mínima). b) Reluctancia máxima (F_{MM} máxima)

• CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO.

• CARACTERÍSTICA DE FUNCIONAMIENTO EN VACÍO.

Es la característica de funcionamiento en la cual la corriente de inducido es nula, siendo la tensión en bornes y la corriente de excitación nominales, y girando el rotor a la velocidad nominal de la máquina, con lo cual $E = U_0$.

La gráfica de esta característica debería ser teóricamente una recta, pero a partir de un cierto valor de la corriente de excitación, se produce la saturación del circuito magnético, con lo cual el flujo en el entrehierro deja de crecer en forma proporcional a la corriente, creciendo menos rápido que esta, y por ende, disminuyendo los valores de tensión en bornes.

La tensión nominal de la máquina se proyecta en un valor ligeramente superior al comienzo de la saturación, por lo cual el circuito magnético de la máquina trabaja generalmente en el estado de saturación.

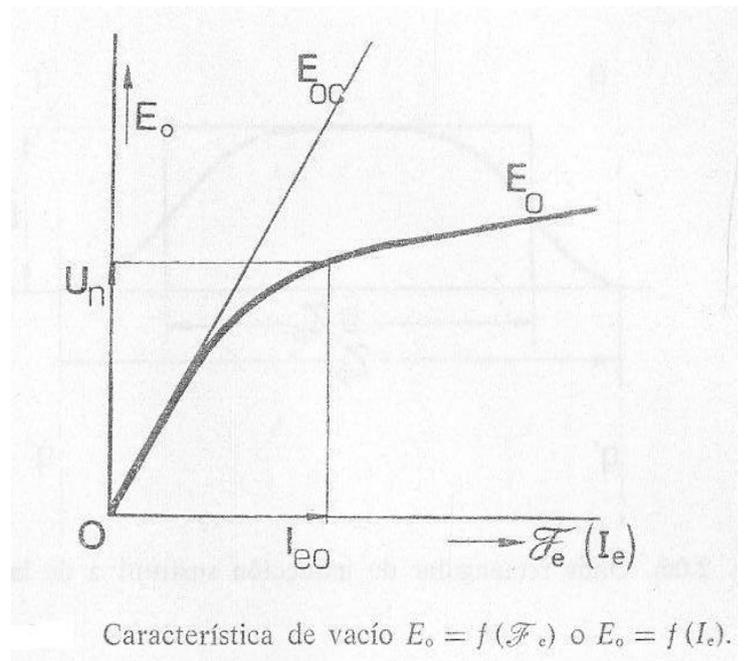
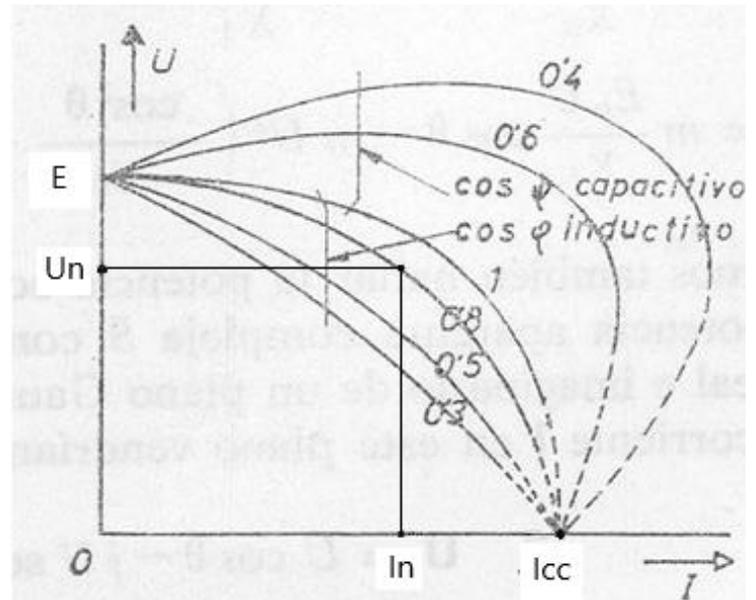


Figura II.36. Característica de vacío.

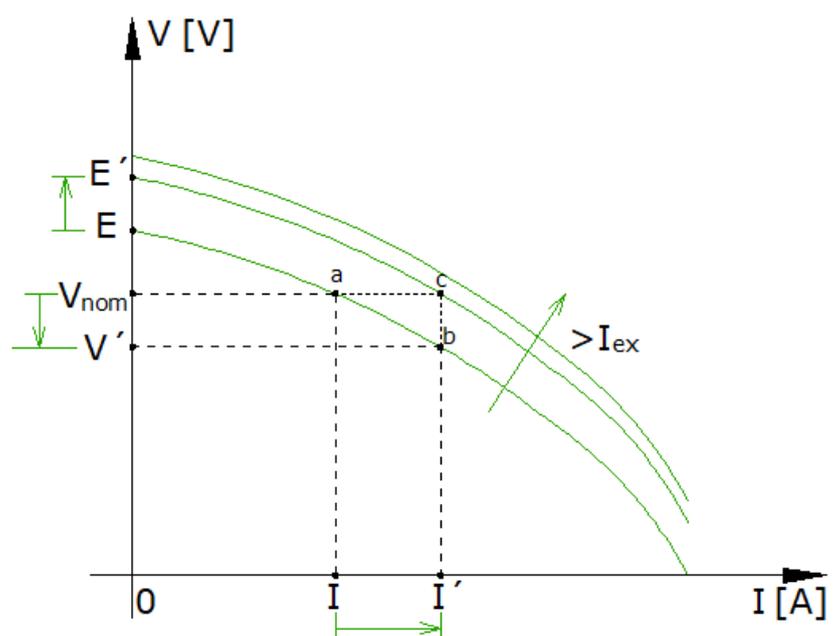
• FUNCIONAMIENTO EN CARGA O CARACTERÍSTICA EXTERIOR.

Figura II.37. Característica exterior

En esta característica, se mantiene constante la corriente de excitación, la frecuencia y la velocidad del rotor en sus valores nominales. Además se mantiene constante el factor de potencia de la carga conectada al alternador. Según se observa en la figura II.35, en función a los diferentes tipos de carga (inductiva, capacitiva o resistiva) se tendrán los diferentes factores de potencia,

y por ende las diversas curvas correspondientes a tales tipos de cargas. A medida que aumenta la corriente de salida, la tensión en bornes disminuye en el caso de cargas resistivas, inductivas y para ciertos valores de las cargas capacitivas, y por otro lado dicha tensión puede llegar a aumentar a partir de determinados valores de cargas capacitivas. La disminución de la tensión de salida se debe a las caídas de tensión producida por la resistencia de los bobinados del inducido, la reactancia de dispersión, sumada al efecto de la reacción de inducido de la máquina. Todos estos efectos se encuentran contemplados en la reactancia sincrónica de la máquina.

En la gráfica mostrada en la figura II-38, observamos la máquina funcionando con una corriente de carga I y una tensión nominal V_{nom} en el punto a de la característica externa, luego la corriente de carga aumenta al valor I' con lo que la tensión de salida de la máquina disminuirá al valor V' en el punto b de la característica, debido al crecimiento de la caída de tensión en la impedancia sincrónica sin que se modifique la fem inducida E en el alternador, que se mantiene aproximadamente

**Figura II.38. Característica externa y control de tensión de salida.**

constante si la velocidad no cambia. Si pretendemos que la tensión no cambie del valor nominal debemos restituir esta caída de tensión aumentando la fem inducida a un valor E' en el punto c de la característica, esto lo logramos aumentando la corriente de excitación en el sistema inductor.

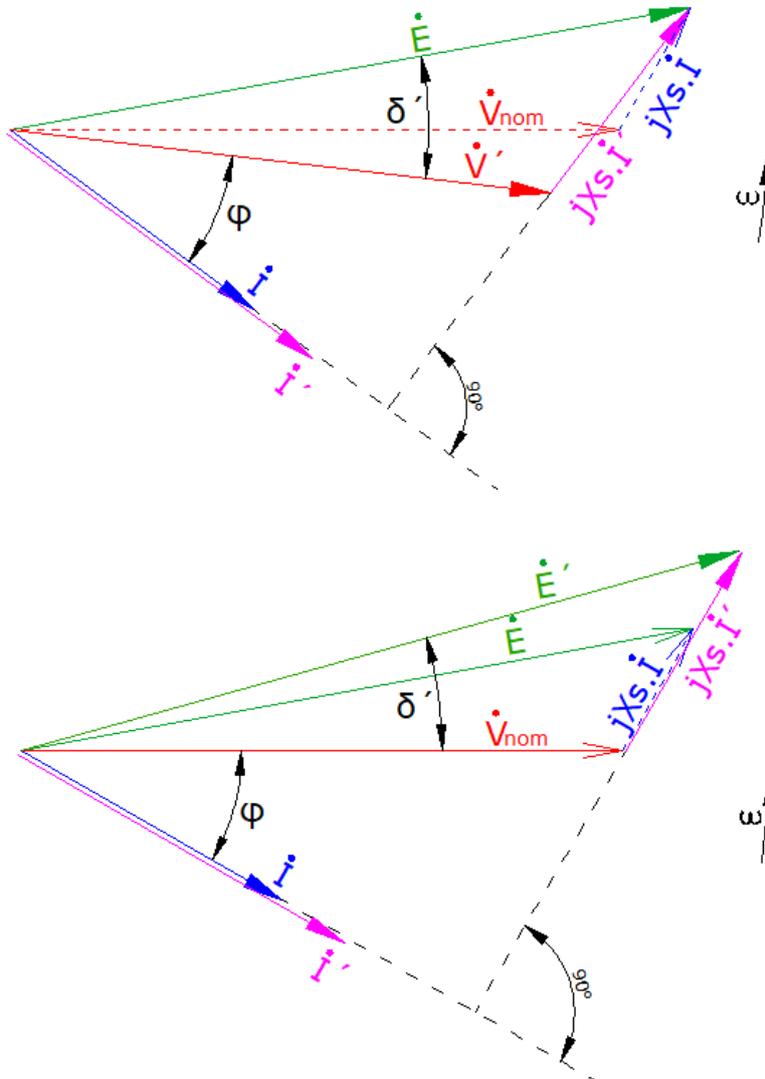


Figura II.39. Variación de la tensión de salida y proceso de regulación de la misma vista en el diagrama fasorial

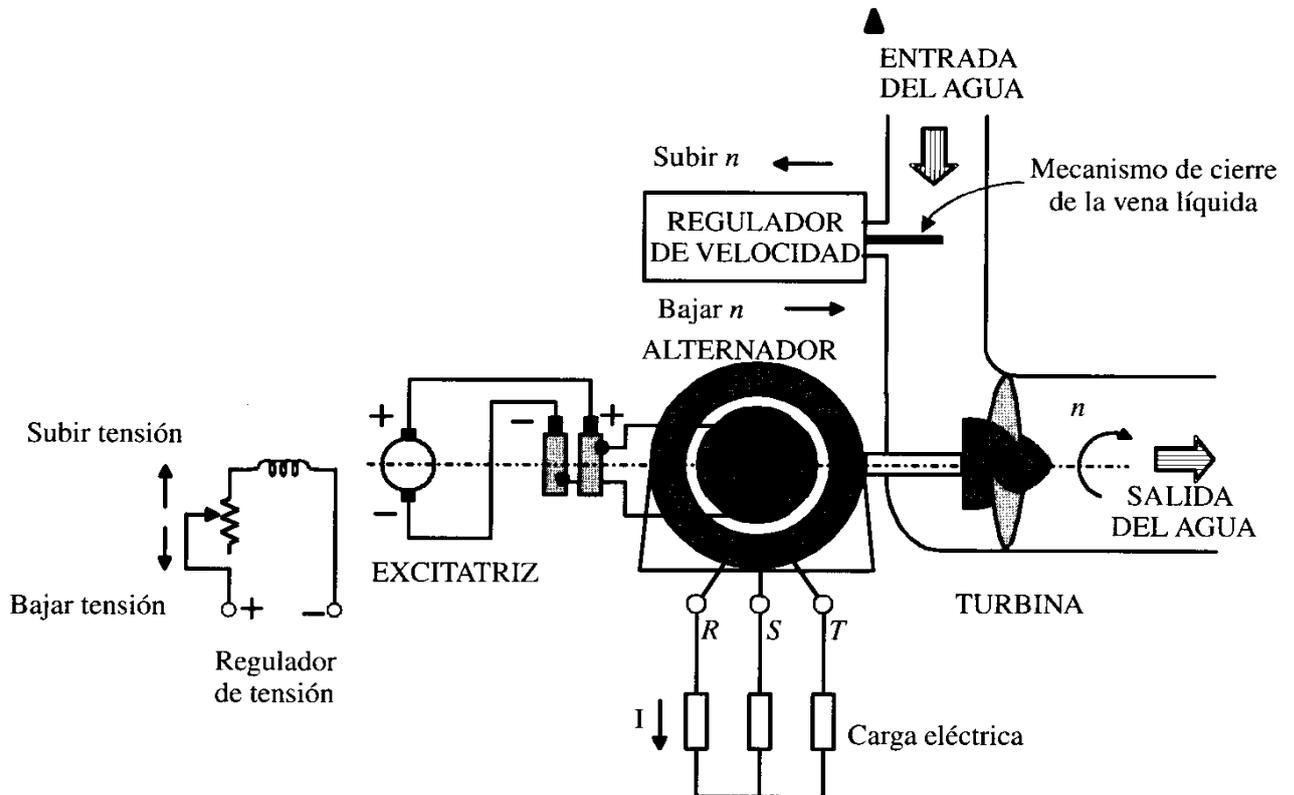
FUNCIONAMIENTO DE UN ALTERNADOR EN UNA RED AISLADA.

- GENERALIDADES.

El comportamiento de un alternador bajo carga varía fuertemente dependiendo del factor de potencia de la carga y de si el generador funciona solo o en paralelo con otros alternadores. En la figura II.40 se muestra el esquema simplificado de un alternador que funciona aisladamente y está alimentando una carga trifásica equilibrada. Se muestran dos controles importantes:

- El regulador de tensión: que se incorpora en la excitatriz y que al variar la corriente de excitación del generador permite controlar la tensión de salida.

- El regulador de velocidad: que se incorpora en el motor primario (en el caso de la figura se ha supuesto una turbina hidráulica). Este actúa sobre la

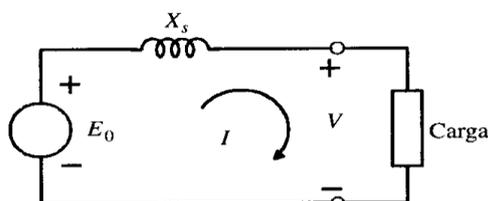


entrada de agua, permitiendo controlar la velocidad, y con ello la frecuencia de generación.

Figura II.40. Funcionamiento de un alternador en una red aislada.

Supóngase en principio que el alternador se mueve a velocidad estrictamente constante, por lo tanto, la frecuencia es un parámetro fijo. Al aumentar la carga, es decir, al incrementarse la potencia activa y reactiva tomada del generador, aumentará la corriente de inducido (I); como no se ha modificado el regulador de tensión, la corriente de excitación será constante. Ahora bien, como aumenta la I , aumenta la f.m.m. de reacción de inducido, lo que da lugar a una f.m.m. resultante menor, una f.e.m. menor y una tensión de salida más baja.

La explicación anterior es más simple si se considera el circuito equivalente de la máquina síncrona, suponiendo una resistencia de inducido nula.



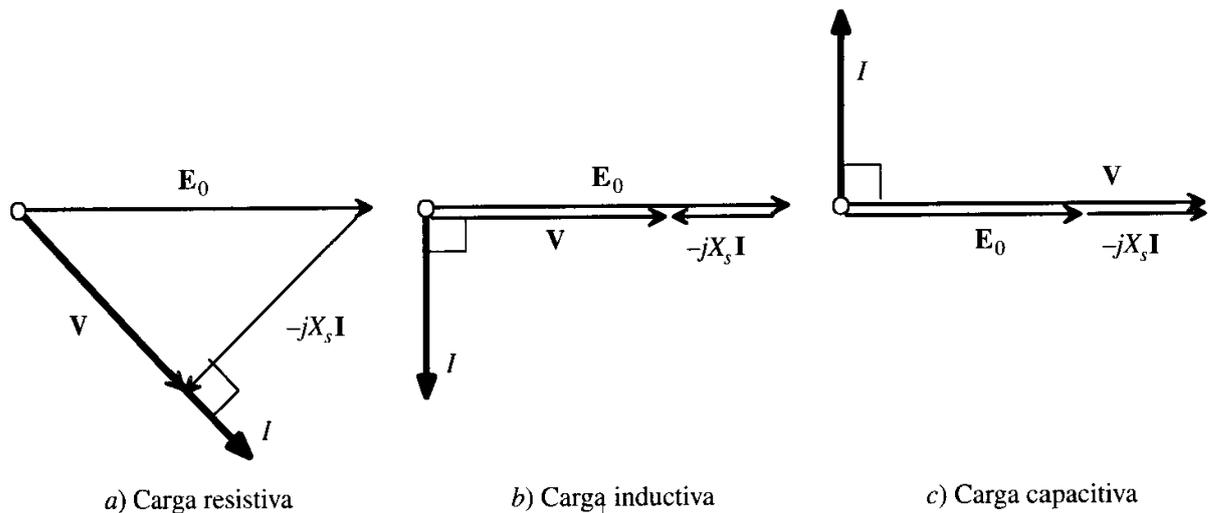


Figura II.41. Circuito equivalente del alternador funcionando en una red aislada

La ecuación que regirá el comportamiento eléctrico de la máquina será:

$$\mathbf{V} = \mathbf{E}_0 - j \mathbf{X}_s \mathbf{I} \quad (\text{II.22})$$

Si la I_{exc} es constante, será constante la f.e.m. E_0 , de tal modo que al aumentar la I , aumentará la caída de tensión en la X_s , lo que se traduce en una reducción de la tensión de salida.

En las figuras II.37 y II-38 se dibujaron las características externas de la máquina y donde puede observarse la variación de la tensión de salida conforme se modifica la intensidad de la carga (para I_{ex} constante). Obsérvese que para cargas inductivas la caída de tensión es mucho más importante que para cargas resistivas en virtud del efecto desmagnetizante de este tipo de cargas. Sin embargo, para cargas capacitivas se obtiene un aumento de la tensión de salida debido a su efecto magnetizante.

En la figuras II.31 y II-32 se muestran estos hechos de modo evidente. Nótese que en los tres diagramas se parte de la misma E_0 y la misma I (misma caída de tensión en la X_s). Para cargas resistivas la reacción de inducido, representada prácticamente por la caída $\mathbf{I} \cdot \mathbf{X}_s$ es casi transversal (E_0 forma un ángulo de 90° con $\mathbf{jX}_s \cdot \mathbf{I}$); en el caso de cargas inductivas la reacción es antagonista y para cargas capacitivas la reacción es magnetizante. Se demuestra que la tensión menor se obtiene para cargas inductivas.

Normalmente interesa que la tensión suministrada a una carga permanezca constante aunque se modifique el consumo. La E_0 es proporcional al flujo inductor, deberá variarse la excitación para cambiar el flujo y así adaptar la nueva E para que se restablezca la tensión al valor asignado.

Esta acción se realiza con el regulador de tensión que es simplemente un reóstato que regula la corriente de campo de la excitatriz, dando esta una tensión de salida que controlará la **I_{ex}** de los polos del alternador.

La potencia suministrada por el generador es la que solicita la carga. Cuando la carga demanda más potencia, el alternador reduce su velocidad; esta disminución es detectada por el regulador de velocidad de la turbina, que provoca, en este caso, una mayor entrada de agua, lo que hace aumentar la velocidad de giro del grupo hasta llegar al valor de la consigna que impone la frecuencia de salida del generador. Cuando se ha alcanzado esta velocidad, la máquina entrega al consumidor la nueva carga solicitada.

A continuación se describen el regulador de tensión y de velocidad de los alternadores.

- REGULACIÓN DE TENSIÓN.
- Necesidad de la regulación de tensión y frecuencia.

En los sistemas de generación y distribución de energía eléctrica existen variaciones de carga.

En toda máquina eléctrica giratoria, si varía la carga (potencia conectada a los bornes del generador) varía la velocidad de la máquina.

Debido a las exigencias del sistema de potencia o de la carga conectada es necesario mantener estable la frecuencia y el valor eficaz de la tensión entregada.

Si varía la velocidad de la máquina, la frecuencia variará en forma proporcional. Para volver a la velocidad nominal del alternador, es necesario actuar sobre la alimentación del motor primario variando, de esta forma, su velocidad.

Generalmente estos sistemas son automáticos, actuando directamente algún sensor que, en función de la variación de velocidad y a través de un transductor, accione la válvula de admisión de combustible de alimentación del motor primario.

Al recuperar el alternador su velocidad nominal, y con ello, la frecuencia de la f.e.m. generada, la tensión entregada al sistema volverá a su valor nominal. Sin embargo, no ocurre esto, dado que debido a que se producen caídas de tensión internas (propias de la máquina), proporcionales a la carga entregada.

$$U = E - I.X_s = E - \Delta U$$

Para un mismo valor de E si la corriente demandada por la carga aumenta, la caída de tensión aumentará también y la tensión en bornes será menor que la inicial. Si la corriente demandada por la carga disminuye, la caída de tensión también disminuye y la tensión en bornes será mayor que la inicial. Por lo tanto,

habrá una variación de la tensión en bornes del alternador al variar la carga, aún cuando se retorne a la velocidad nominal, lo que implica frecuencia nominal.

Por ejemplo, si en un sistema de distribución de energía la carga disminuye:

- La velocidad del alternador aumenta.
- La frecuencia aumenta.
- Se actúa sobre el motor impulsor del alternador, bajando su velocidad.
- La f.e.m. generada aumenta.

Una de las funciones más importantes del sistema inductor del alternador es la de regulación de tensión. Mediante circuitos adecuados es posible actuar sobre la corriente de excitación de la excitatriz y, de esta forma, variar la magnitud de la f.e.m. generada.

- Regulación automática de la tensión.

Los reguladores automáticos deben cumplir con las siguientes características:

- Intervenir rápidamente después de una variación de carga.
- Exactitud: llegar al valor de régimen.
- Sensibilidad: reaccionar a perturbaciones débiles.
- Amortiguación eficaz: evitar grandes oscilaciones.

Los reguladores de tensión automáticos pueden tener, en lugar de una variación continua de resistencia, una variación a saltos, mediante el proceso de agregar o quitar resistencias.

Un sistema de regulación de tensión automático para alternadores con escobillas y excitatriz electromecánica puede ser el sistema Tirril que se esquematiza a continuación.

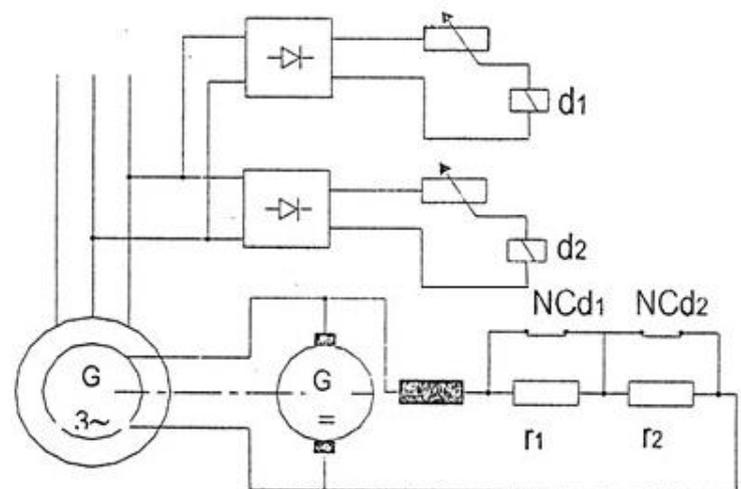


Figura II.42: Sistema Tirril

Referencias:

d₁ y **d₂**: Relés que se activan y desactivan a una tensión determinada. Se activan al superar levemente la tensión nominal.

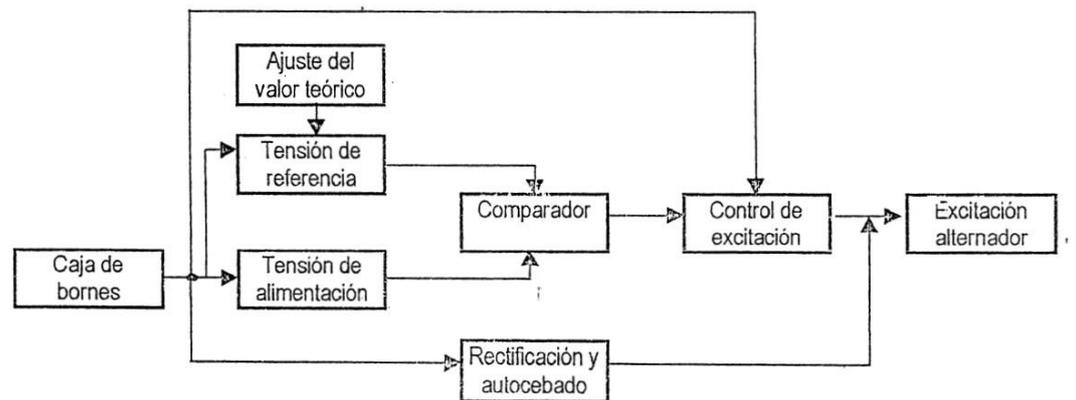
NCd₁ y **NCd₂**: contactos normales cerrados de **d₁** y **d₂**.

r₁ y **r₂**: saltos de resistencia de regulación.

Otros sistema de autoexcitación con excitatriz electromecánica, aprovechan la tensión generada en el alternador, la rectifica y agrega otro devanado en la excitación del generador de corriente continua, que actúa como comparador, aumentando o disminuyendo la autoexcitación del mismo cuando aumenta o disminuye la carga.

Los sistemas que utilizan excitatrices electrónicas utilizan generalmente sistemas de regulación automáticos. El diagrama de bloques de la figura II.31 ilustra el principio de funcionamiento de una excitatriz electrónica para alternadores sin escobillas.

Figura II.43:
Diagrama de bloques de una excitatriz electrónica



La excitatriz se alimenta de la salida de CA del alternador. Su tensión se descompone en dos: una tensión que alimenta los circuitos electrónicos y otra que se reduce a un valor muy bajo por un divisor de tensión y sirve como tensión de referencia. Un comparador de tensión compara constantemente estas 2 tensiones y cuando su diferencia supera el valor de referencia (ajustable), el control de excitación (generalmente un tiristor) suministra más o menos corriente de excitación según sea el valor de la diferencia de tensiones.

Es necesario emplear un sistema de autocebado debido a que la tensión generada por el alternador resulta insuficiente para que se active la puerta del tiristor. Una vez que el alternador genera a la tensión nominal o próximo a él, se desconecta este circuito pasando el control de excitación a manos de un regulador electrónico.

- **REGULACIÓN DE VELOCIDAD.**

En un sistema eléctrico la potencia demandada varía continuamente y es necesario disponer los mecanismos de regulación útiles para adaptar en todo momento la generación al consumo. Cuando se produce un aumento en la potencia eléctrica absorbida por los receptores, en tanto no se modifique la potencia mecánica suministrada por el motor primario del alternador, la energía adicional requerida se extrae de la energía cinética almacenada en las masas giratorias del

sistema, con lo cual la velocidad de giro del grupo experimentará un descenso que se refleja en la misma proporción en la frecuencia del generador.

En una central eléctrica, en cada unidad generadora se controla la velocidad del grupo mediante el regulador de velocidad de turbina. El mismo consta de los siguientes elementos:

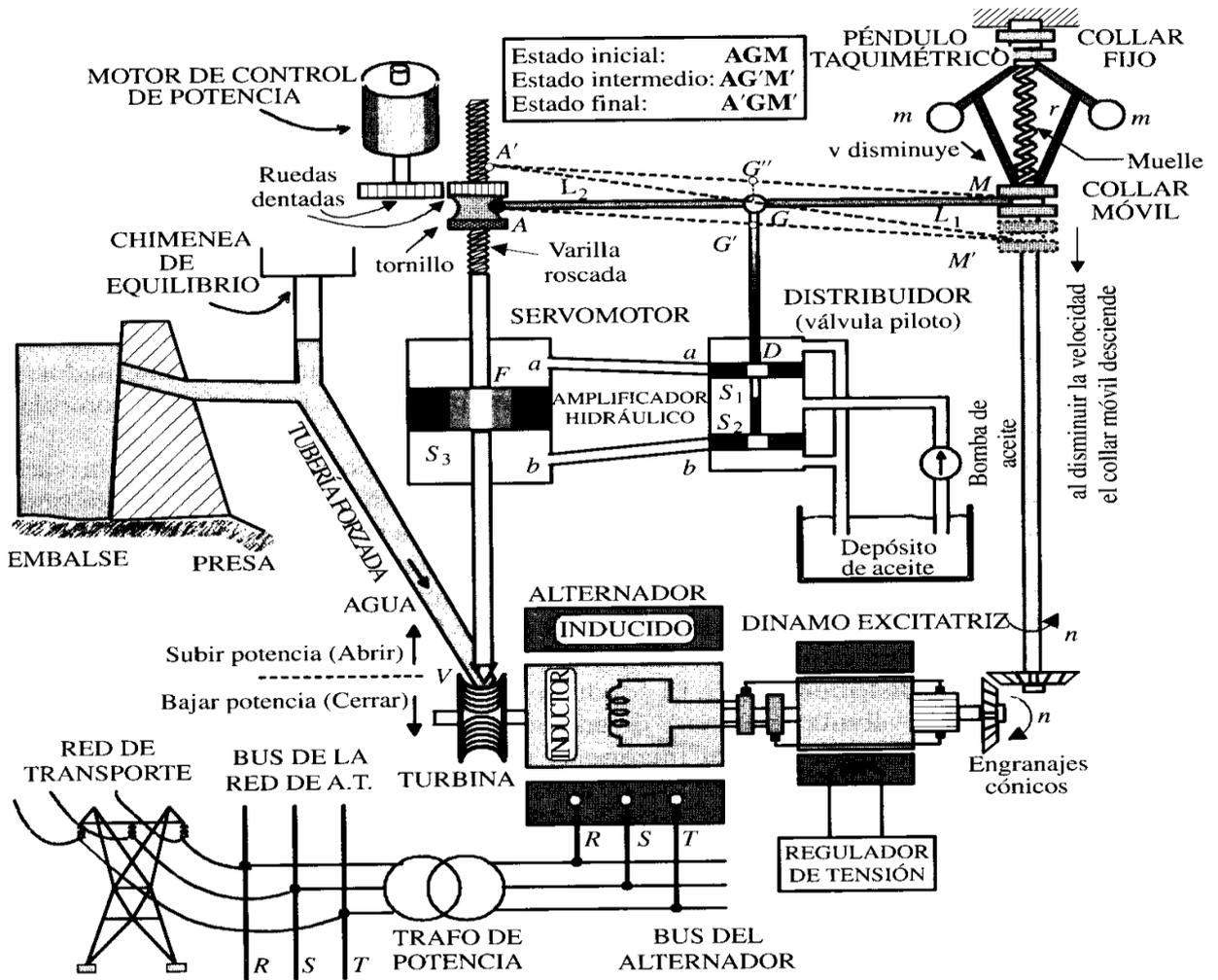


Figura 5.34. Esquema de una central hidroeléctrica en el que se destaca el regulador de velocidad.

Figura II.44: Esquema de una central hidroeléctrica con regulador de velocidad

- Péndulo taquimétrico.

Es el órgano sensible a la velocidad de rotación de la máquina. Está constituido por dos masas (**m**) que giran con el árbol de la máquina, bien directamente o a través de una caja de engranajes con una cierta desmultiplicación. Las masas van unidas a unos collares a través de unas barras rígidas. Un collar es fijo (el superior) y el otro es móvil y se desliza sobre un eje que lleva un resorte (**r**) cuya tensión es regulable. Las masas al girar tienden a separarse por efecto de la fuerza centrífuga venciendo la fuerza antagonista del resorte. Como consecuencia del movimiento del anillo móvil, se produce la actuación de un servomotor hidráulico que provocará la

apertura o cierre del agua de entrada a la turbina, que controlará de este modo la potencia mecánica suministrada a la máquina.

Hoy en día se van introduciendo sensores de velocidad no mecánicos que miden las revoluciones del árbol del grupo turbina-generador indirectamente a través de la frecuencia o por medio de tacómetros eléctricos.

- Amplificador hidráulico.

Comprende un distribuidor o válvula piloto y un pistón principal que hace las veces del servomotor. La válvula piloto está constituida por un cilindro de cinco orificios de acceso, dos de ellos están en comunicación con el recipiente de aceite que sirve para el accionamiento de la válvula, otro está en comunicación con una bomba de aceite para dar presión al mismo y los otros dos están unidos al servomotor. En el interior del cilindro existen dos émbolos movidos por el collar deslizante del péndulo a través de un brazo de palanca (L_1). Si los pistones S_1 y S_2 se mueven hacia arriba, el aceite a alta presión proveniente de la bomba sale por el orificio "a" de la válvula piloto y penetra en la cámara superior del servomotor. La cámara inferior está en comunicación con el tubo de descarga (presión atmosférica). Se tendrá una diferencia de presiones entre ambas cámaras que provocará un movimiento del émbolo S_3 hacia abajo. El eje del servomotor actúa directamente sobre un inyector que controla la entrada de agua a la turbina mediante la válvula de aguja (V). El movimiento de la válvula piloto convierte una potencia de nivel bajo en otra de gran valor en el pistón principal del servomotor.

La válvula piloto es de tipo diferencial, de tal forma que las fuerzas que provoca la presión sobre los pistones S_1 y S_2 se equilibra en reposo y de este modo se requiere muy poco esfuerzo para cambiar su posición. Con una pequeña fuerza aplicada al nudo M se conseguiría un desplazamiento de los pistones que haría actuar el émbolo S_3 del servomotor con la fuerza suficiente para cerrar o abrir el inyector.

- Palanca de unión.

Representada por la varilla rígida AGM , cuya misión es hacer que se muevan los pistones de la válvula piloto proporcionalmente al cambio de velocidad del eje turbina-alternador. La parte AG proporciona una realimentación para el movimiento del inyector que controla la entrada de agua por medio de la válvula de aguja V .

Si se produce un aumento de la potencia eléctrica demandada por la red, se producirá instantáneamente una reducción de velocidad del grupo. El collar M , bajo la acción del péndulo taquimétrico, va descendiendo lentamente hasta M' arrastrando el vástago MA y la palanca del distribuido GD . El conducto b se abre y

el aceite empuja al émbolo S_3 hacia arriba abriendo la válvula aguja V de admisión del agua y la velocidad va decreciendo cada vez más lentamente hasta cesar finalmente su decaimiento. El punto A , que sigue los desplazamientos de la válvula, llega a A' , lleva la palanca AM a la posición $A'M'$ y el vástago GD sube (G se desplaza a G' y luego vuelve a G).

Cuando el sistema alcanza finalmente una posición de equilibrio, esta situación será diferente de la primera; el collar M estará en un punto intermedio entre M y M' , lo que significa que la velocidad es inferior a la que tenía en la situación anterior y el punto A se sitúa entre A y A' . El consumo de agua es superior al que era antes. A un aumento de la carga ha correspondido una ligera disminución de velocidad. La regulación efectuada por este regulador es imperfecta, pero es rápida y estable.

La posición del vástago de la válvula determina el consumo de agua en la turbina, es decir, la potencia de la turbina, que coincide en definitiva con la potencia eléctrica suministrada por el generador. La posición del collar deslizante depende de la velocidad de la turbina. Se puede decir entonces que existe una relación entre la potencia y la velocidad de la turbina. Esta relación que se traduce por una curva, lleva el nombre de estatismo y se ha representado en la figura II.34.

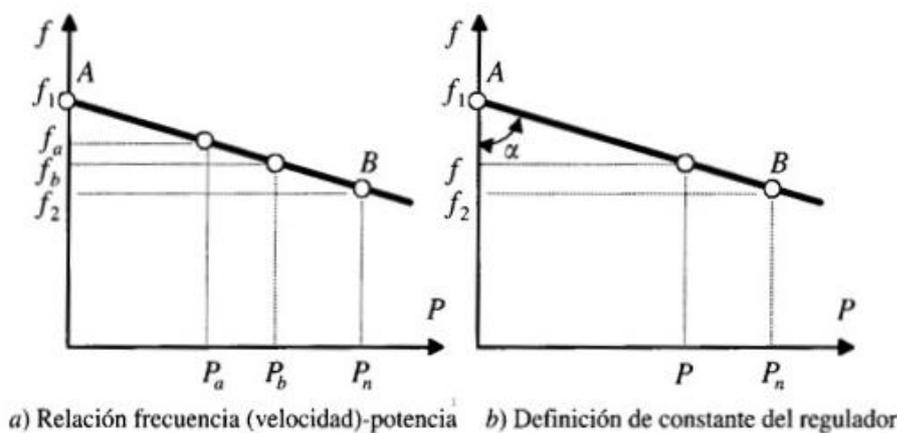


Figura II.45: Recta de estatismo de un alternador

La curva de estatismo nos da la variación de velocidad del alternador, es decir, de su frecuencia, cuando pasa de la marcha en vacío a plena carga, definida por su potencia asignada P_n . El punto A corresponde a la marcha en vacío y el punto B corresponde a la potencia máxima. La frecuencia asignada se toma como la

frecuencia media:
$$f_n = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad (II.23)$$

$$\delta_r = \frac{f_1 - f_2}{f_n} \quad (II.24)$$

Y con ello se define el **estatismo** por el cociente:

El valor anterior suele expresarse en tanto por ciento y rara vez excede el 4%. En la situación del ejemplo tratado anteriormente, inicialmente la máquina

desarrollaba una potencia P_a correspondiente a una frecuencia f_a ; al aumentar la potencia demandada a un valor $P_b > P_a$, el grupo reduce ligeramente su velocidad, dando lugar a una frecuencia $f_b < f_a$.

- Motor de control de potencia.

Constituye la denominada regulación secundaria de la potencia suministrada por la turbina manteniendo la frecuencia constante. El regulador de velocidad efectúa un control primario, que debe ser corregido por un dispositivo especial que devolverá la frecuencia a su valor asignado.

La regulación secundaria se obtiene haciendo variar la posición del punto A , es decir, modificando la longitud del vástago AF del servomotor. Sobre este vástago está dispuesto un piñón o tornillo que se puede enroscar o desenroscar por la acción de un motor auxiliar de control de potencia. En su movimiento el tornillo arrastra el extremo A de la palanca AM .

Supongamos que la potencia eléctrica demandada por la red aumente, entonces, la velocidad del grupo bajará, el consumo de agua aumentará y la varilla AGM irá a $A'GM'$. Si actuamos ahora sobre el motor de control de potencia haciendo roscar el tornillo para volver el punto A' a A , la palanca AGM toma su posición inicial y al mismo tiempo la velocidad adquiere su valor nominal. Al pasar el punto A a A' , se tiene que aumentar al mismo tiempo la admisión de agua en la turbina, lo que permite obtener el aumento de velocidad pretendido (la varilla pasa a la posición intermedia $A'G''M$).

Si trazamos en la figura II.46 la curva de estatismo del alternador, antes de la acción del motor de control de potencia y otra después, notaremos que la curva de estatismo está desplazada paralelamente a ella para trasladarse de la primera posición a la segunda. Inicialmente la máquina trabajaba con la curva de estatismo AB , el régimen de funcionamiento estaba representado por el punto C , suministrando la potencia P a la frecuencia asignada f_n .

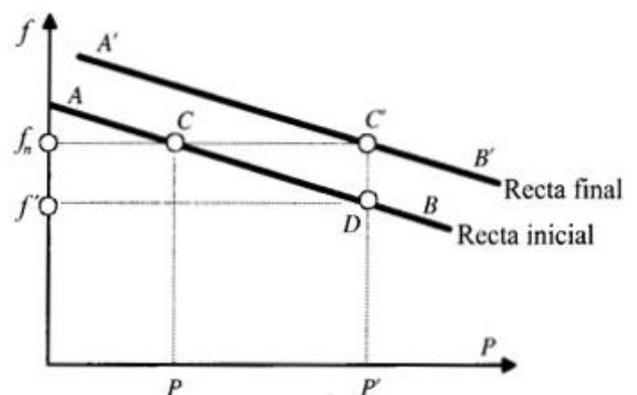


Figura II.46: Desplazamiento de las rectas de estatismo mediante el motor de control de potencia

Al aumentar la potencia eléctrica demandada a un nuevo valor $P' > P$, el nuevo punto de funcionamiento (sin actuar el dispositivo de regulación secundaria) sería el D , que corresponde a la frecuencia f' . Al actuar sobre el motor de control se

consigue obtener una nueva curva de estatismo $A'B'$ paralela a la original, de tal modo que el nuevo punto de equilibrio es el C' , suministrando la máquina la nueva potencia P' a la frecuencia asignada f_n .

• FUNCIONAMIENTO EN PARALELO DE ALTERNADORES.

• CONDICIONES PARA REALIZAR EL PARALELO.

Las condiciones a cumplir para la puesta en paralelo de dos alternadores son las siguientes:

- Igualdad de secuencias de las tensiones trifásicas.
- Igualdad de magnitud de las tensiones compuestas.
- Igualdad de frecuencias.
- Igualdad de fase para las tres tensiones de fase en el momento de la operación.

En primer lugar, con un secuencímetro se verifica que la secuencia de las fases del alternador se corresponda con la de la línea a la cual se quiere realizar el paralelo.

Mediante la corriente de excitación se regula la tensión del generador que se quiere conectar en paralelo con aquél que ya se encuentra funcionando, para lo cual se observan los voltímetros hasta que $U_1 = U_2$.

Con el frecuencímetro se ve la frecuencia de la máquina, y por ende, se regula la velocidad de giro de la máquina motriz primaria acoplada al alternador, hasta lograr $f_1 = f_2$.

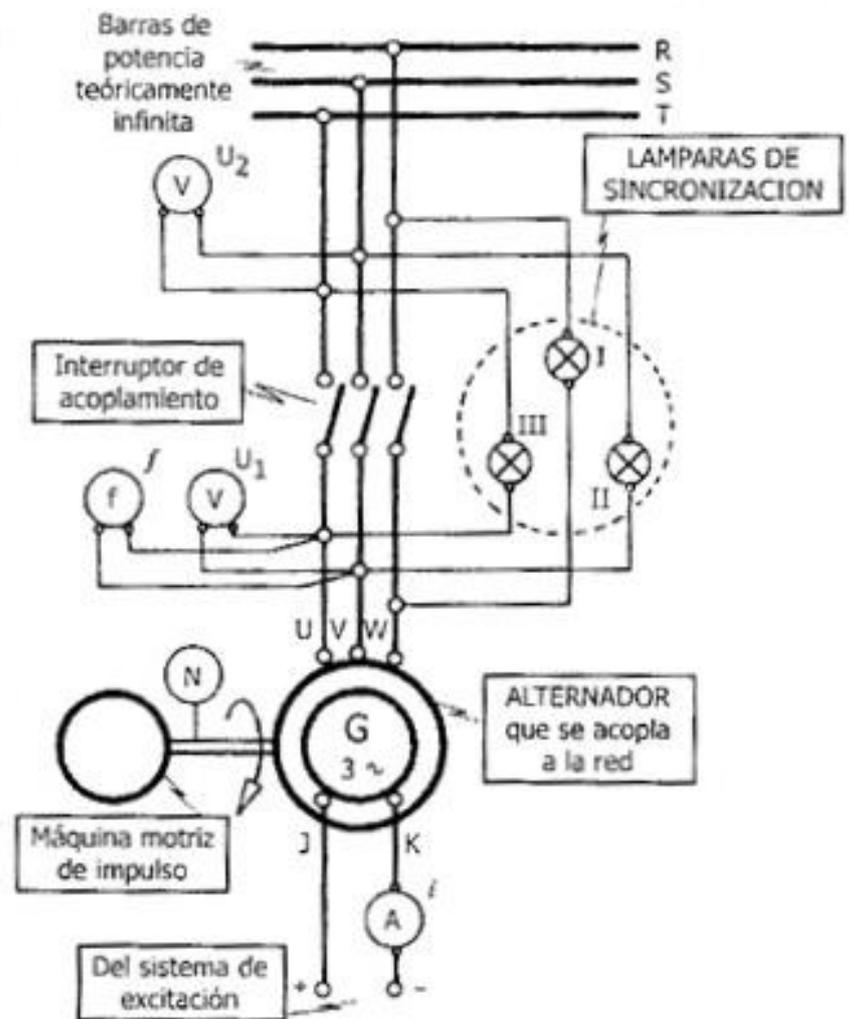


Figura II.47. Conexión del paralelo de un alternador a la red

Por último, la igualdad de fases en el momento de la conexión se verifica con un sincronoscopio, el cual consta de tres lámparas. Cuando estas están apagadas, entonces, la tensión entre los extremos del interruptor de maniobra (compuesta) es nula. En esa condición se puede cerrar el interruptor sin problemas.

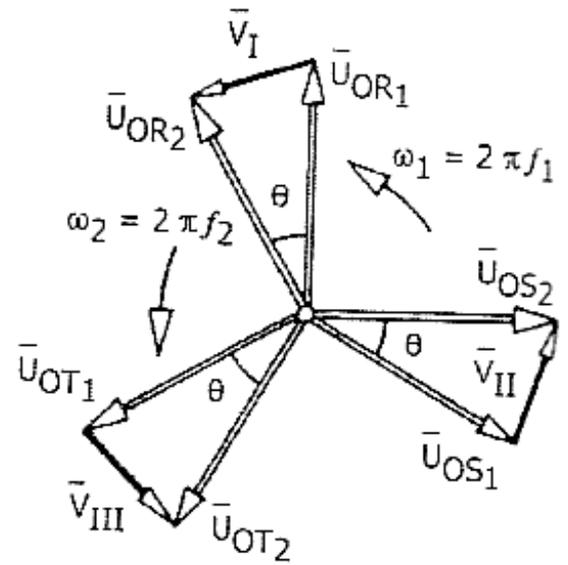
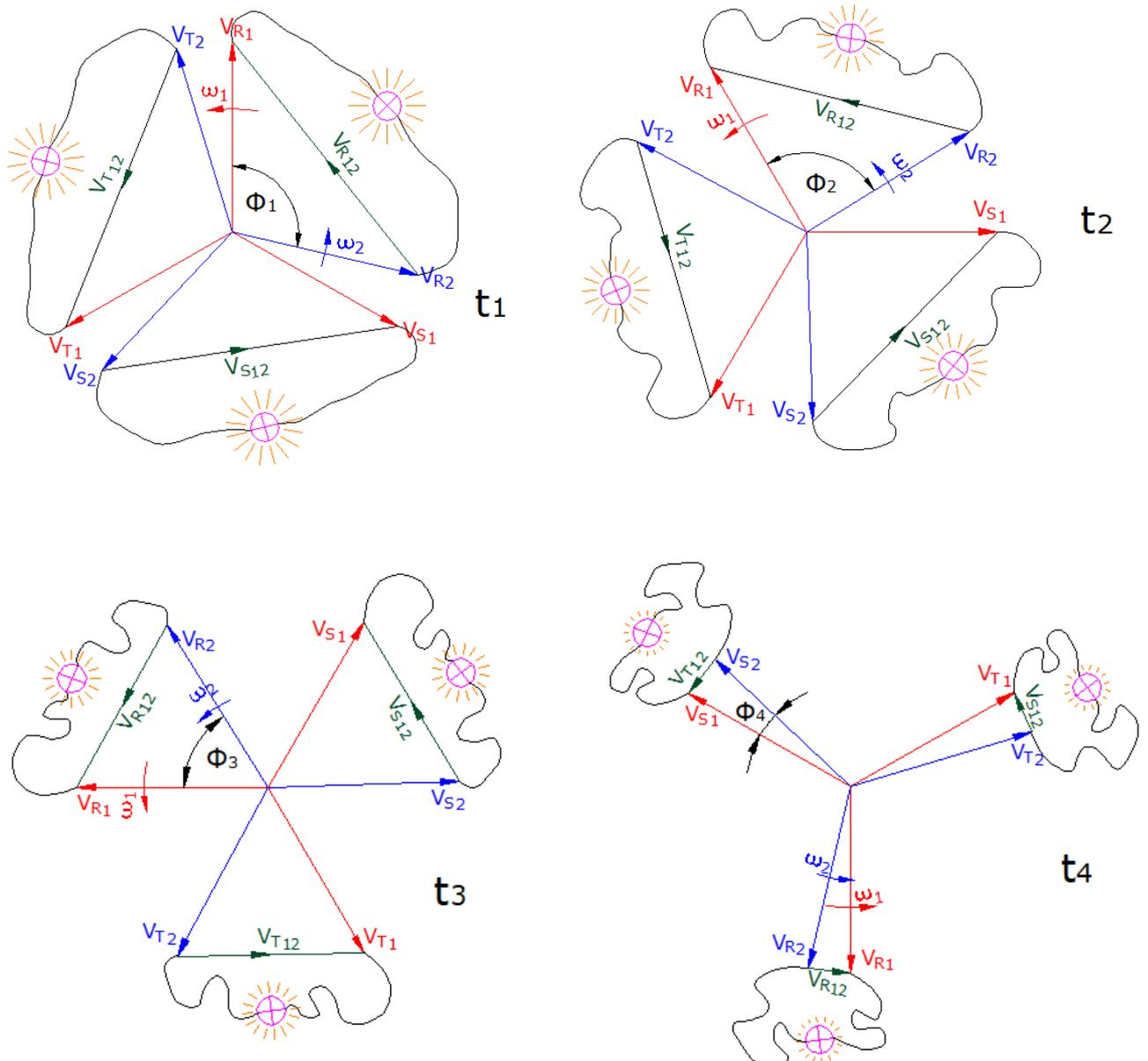
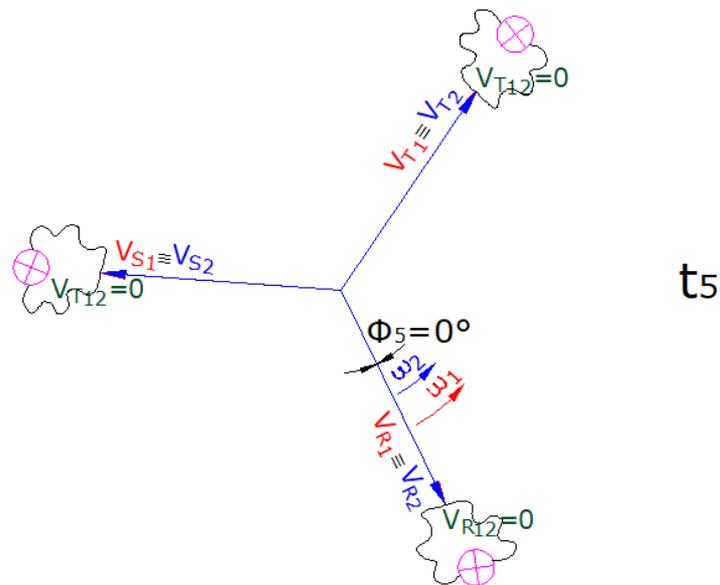


Figura II.48. Diagrama fasorial y diferencia de fase.

Figura II.49. Secuencia en el tiempo de las ternas de tensiones de los dos alternadores, girando a velocidades diferentes (Levemente) y momento en el que están en fase (t5), todas las lámparas apagadas.





• **FUNCIONAMIENTO DEL SINCRONOSCOPIO.**

Si la secuencia de las fases del generador y la red son idénticas y las 3 lámparas del sincronoscopio se colocan formando los vértices de un triángulo equilátero, con las conexiones indicadas en la figura II.50, aparecerá una rotación en la iluminación de las lámparas, cuyo brillo cambiará con el tiempo.

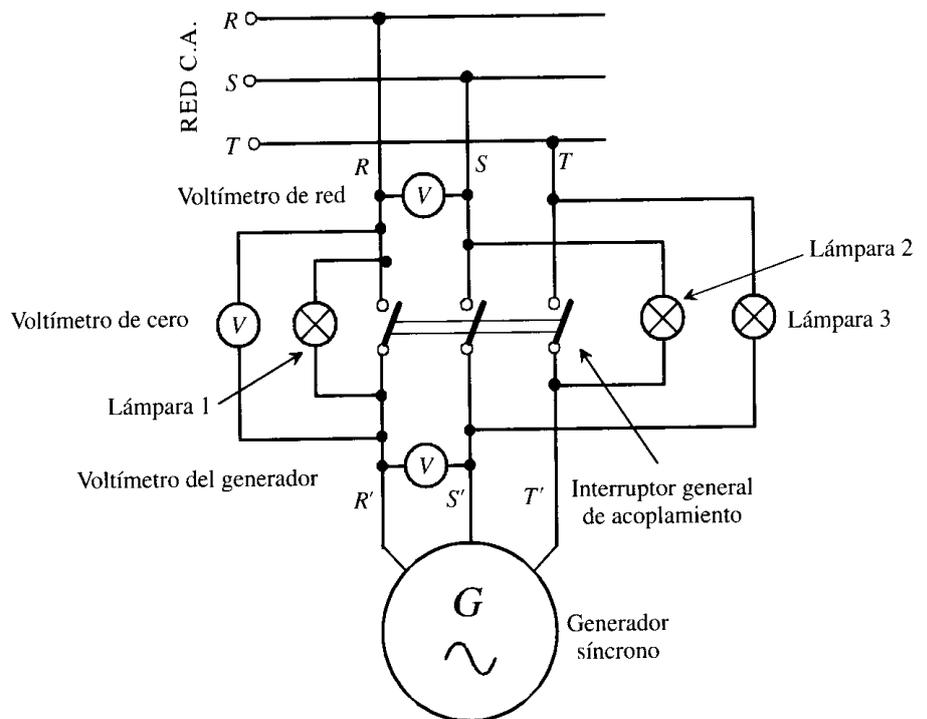


Figura II.50: Sincronoscopio de lámparas para acoplar un alternador a la red.

En la figura II.51 se muestran los tres fasores de la tensión de la red (V_R, V_S, V_T) y los del generador ($V_{R'}, V_{S'}, V_{T'}$) uno que gira a la velocidad de pulsación de la red ω y otro a la velocidad de la pulsación del alternador ω' . Es decir, si se supone que permanecen fijos los fasores de red, los fasores del generador girarán a una velocidad $\omega' - \omega$ respecto a la red.

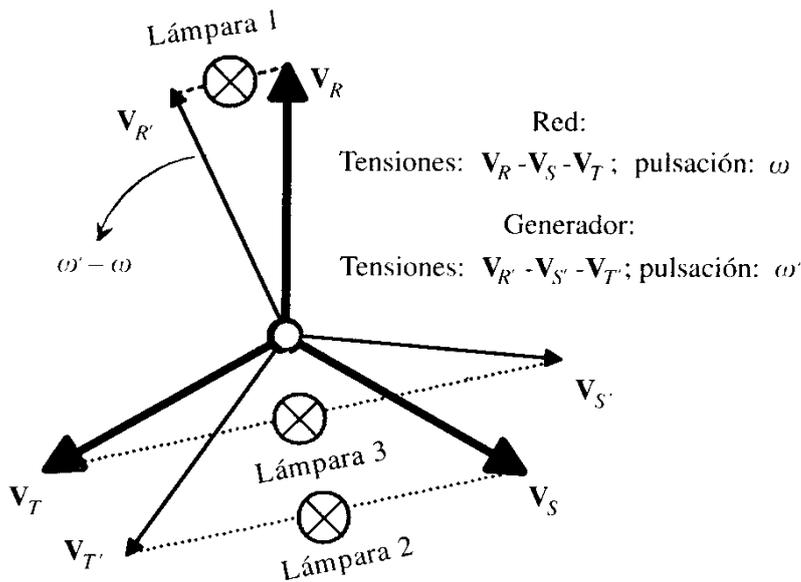


Figura II.51: Fasores de tensiones de la red y el alternador. Sincronoscopio de dos lámparas prendidas y una apagada.

En el instante señalado en la figura II.51, la lámpara 1 estará casi apagada y la 3 será la que brille más intensamente. Conforme gira el sistema fasorial $V_{R'}$, $V_{S'}$, $V_{T'}$ a la velocidad $\omega' - \omega > 0$, el brillo de las lámparas se sucede en el sentido 1-2-3. La secuencia con la que se produce la máxima iluminación de las lámparas indicará el modo de actuar sobre el motor primario; es decir, si por ejemplo, la iluminación rota en el sentido 1-2-3 indica que $\omega' > \omega$, esto es, la frecuencia del alternador es mayor a la de la red y por lo tanto habrá que reducir la velocidad de la máquina motriz, cerrando la admisión de agua. Cuanto más cerca esté ω' de ω más lento será el movimiento de esta sucesión. La igualdad de fase se cumplirá cuando sea nula la tensión o iluminación de la lámpara 1, que es la que está conectada entre bornes homólogos (R y R'); en ese instante habrá que cerrar el interruptor general, y el alternador quedará acoplado a la red.

En las instalaciones modernas se emplean unas columnas de sincronización compuestas por un brazo saliente y giratorio del cuadro general de la central y que tienen dos voltímetros (red y generador), dos frecuencímetros (red y generador), un voltímetro de cero y un sincronoscopio de aguja.

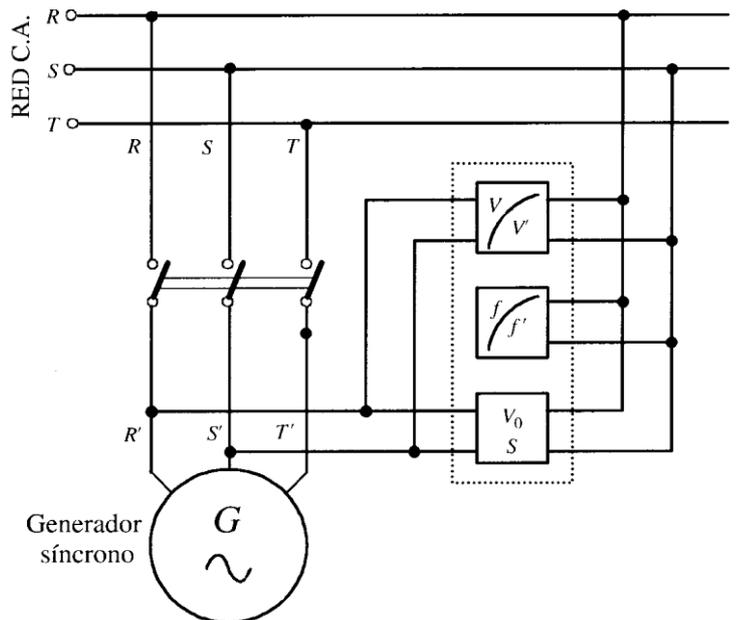


Figura II.52: Columna de sincronización para el acoplamiento de un alternador a la red

En las centrales automáticas, el acoplamiento se hace automáticamente con la ayuda de equipos electrónicos.

- **ELECCIÓN DE ALTERNADORES PARA GRUPOS ELECTRÓGENOS.**

- GENERALIDADES.

Para seleccionar un alternador de un grupo electrógeno, deberá tenerse en cuenta la potencia total de las cargas que se conectan simultáneamente a él. En gran cantidad de aplicaciones, los grupos electrógenos se utilizan como alimentación de emergencia en caso de corte de suministro de energía eléctrica normal. En esos casos, el alternador deberá alimentar a un grupo de cargas esenciales y la potencia del mismo deberá responder a la totalidad de las cargas mencionadas.

- ALIMENTACIÓN DE MOTORES ELÉCTRICOS.

La potencia del alternador a utilizar en una aplicación donde se utiliza un motor o un grupo de motores no debe calcularse en función de la intensidad nominal de los mismos, debido a que se debe tener en cuenta el consumo de corriente en el arranque. La mayoría de los motores no arrancan a plena carga, por lo que se puede emplear una expresión empírica que da un resultado aceptable, suponiendo al motor arrancando en vacío o con poca carga.

Se distingue entre arranque directo, donde la potencia nominal del alternador (S_a), en [KVA], es 2,3 veces la potencia nominal del motor (P_m) dado en [CV].

$$S_a = 2,3 \cdot P_m \quad (\text{II.25})$$

Para el caso de motores con arranque estrella-triángulo, la potencia nominal del alternador es:

$$S_a = 1,35 \cdot P_m \quad (\text{II.26})$$

	DATOS DEL MOTOR						Alternador recomendado en [KVA]	
	CV	KW	I (220V)	I (380V)	Cos φ	η [%]		
Arranque Directo	0,5	0,37	1,9	1,1	0,71	72	2	
	0,75	0,55	2,6	1,5	0,75	74	2	
	1	0,75	3,5	2	0,77	75	3	
	1,5	1,1	4,7	2,7	0,80	77	3,5	
	2	1,5	6,2	3,6	0,80	79	5	
	3	2,2	8,8	5,1	0,81	81	7	
Directo o Estrella - Triángulo							Δ	Y Δ
	4	3	11,6	6,7	0,82	83	10	6
	5,5	4	15	8,7	0,83	84	13,5	7,5
Arranque Estrella - Triángulo	7,5	5,5	20	11,6	0,84	86	10	
	10	7,5	26,6	15,4	0,85	87	13,5	
	15	11	39	22,4	0,85	88	22	
	20	15	51,5	29,6	0,86	89	28	
	25	18,5	63	36,5	0,86	90	35	
	30	22	75	43	0,86	90	42	
	40	30	99	57	0,87	90	54	
	50	37	121	70	0,87	92	75	
	60	45	147	85	0,87	92	81	
	75	55	180	104	0,87	92	102	
100	75	242	140	0,88	92	135		

Si el motor arranca a plena carga como en el caso de bombas sumergibles, el requerimiento de corriente eléctrica en el arranque será mayor.

Los fabricantes de bombas dan los valores mínimos recomendados de potencia nominal del alternador en función de la potencia del grupo sumergido, tal como se muestra en la tabla II.1.

Tabla II.1. Alternador recomendado para bombas sumergidas (arranque bajo carga)

Potencia del grupo sumergido		Potencia Mínima del Alternador en kVA
CV	kW	
0,5	0,37	2
0,75	0,55	2,5
1	0,75	3
1,5	1,1	4,5
2	1,5	5
3	2,2	7,5
5	3,7	11
7,5	5,5	15
10	7,5	18
15	11	27
20	15	36
25	18,5	45
30	22	55
35	26	65
40	30	75
50	37	90
60	45	110
70	52	130
80	59	150
90	67	165
100	74	185
125	92	230
150	111	260

- **ELECCIÓN DEL MOTOR DIESEL DE ARRASTRE.**

La potencia nominal de motor de combustión interna (CV) debe ser suficiente para que el alternador pueda trabajar a sus características nominales y a plena carga con un factor de potencia de 0,8. La tabla II.2 recomienda una potencia nominal en [CV] para accionar un alternador de determinada potencia en [kVA].

Tabla II.2. Potencia nominal del motor de arrastre para distintas potencias de alternadores

Alternador [kVA]	Motor Arrastre [CV]	Alternador [kVA]	Motor Arrastre [CV]
2	3,5	35	44
3	5	40	52,5
4	6,5	50	62
5	7	55	71
6	10	60	74
8	12	65	82
10	14	75	92
12,5	18	80	110
15	22	90	110
20	25	100	130
25	35	105	130
30	40		

- **DATOS NOMINALES Y CORRECCIONES.**

Los datos indicados por los fabricantes en los catálogos de las características de los alternadores, se refieren a condiciones nominales de funcionamiento. Estas condiciones son:

- $\cos\phi \geq 0,8$
- temperatura ambiente < 40 [°C]
- altitud sobre el nivel del mar ≤ 1000 [m]

Por las características de las cargas a conectar y los requerimientos normales del factor de potencia, la primera condición se cumple con bastante exactitud.

Las otras dos se deben tener en cuenta según el lugar donde se instale el grupo. Por este motivo cuando se sobrepase alguno de dichos valores, la potencia máxima que se puede demandar al generador disminuye y se puede calcular:

$$S_{\max} = S_{\text{nom}} \cdot f_{\text{temp}} \cdot f_{\text{alt}} \quad (\text{II.27})$$

f_{temp} : factor de corrección por temperatura

f_{alt} : factor de corrección por altitud

Esto significa que si se debe entregar una potencia determinada en condiciones distintas de las normales, se deberá encontrar, mediante la aplicación de estos factores, la potencia nominal del alternador necesario para tal fin.

Las gráficas de las figuras II.39 y II.40 permiten obtener los factores de corrección.

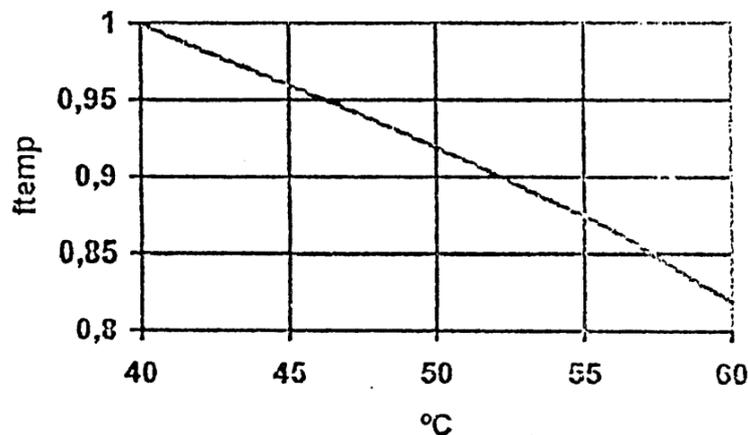


Figura II.53: Factor de corrección por temperatura

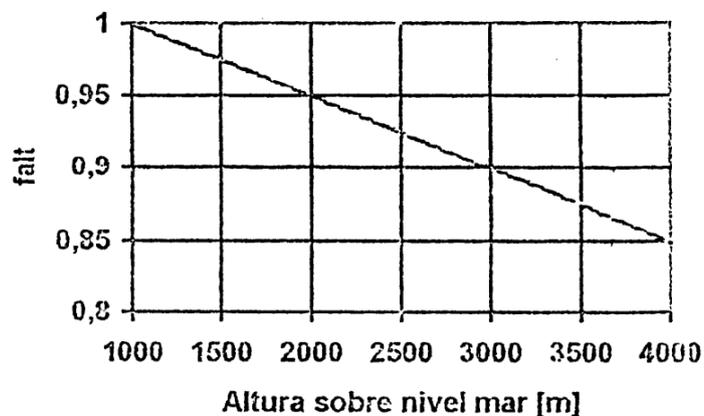
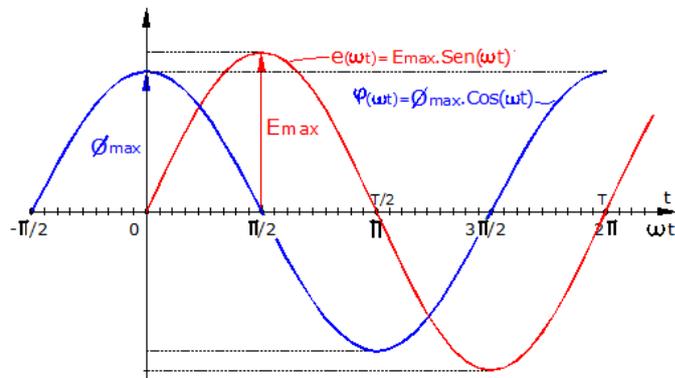
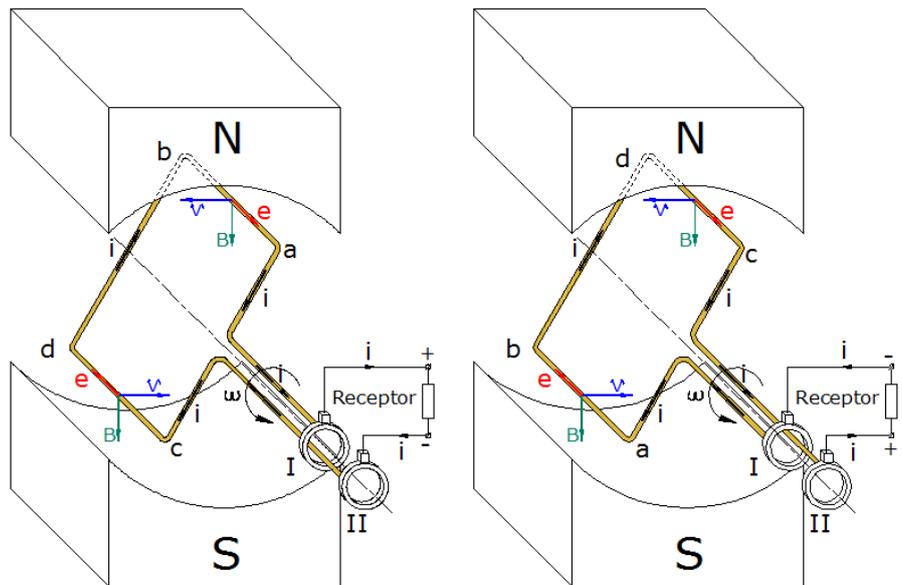


Figura II.54: Factor de corrección por altitud

Anexo

Alternador



Dínamo

