

## CAPITULO 12

### 12. MAQUINAS GENERADORAS

El movimiento proveniente de las máquinas primarias en las centrales convencionales, se aplica a los *alternadores sincrónicos trifásicos*, único tipo de máquina a la que habremos de referirnos. Rara vez se utilizan los alternadores monofásicos, y en caso de necesitarse corriente continua en escala industrial, se la genera por medio de un alternador seguido de un sistema rectificador apropiado. Para todo el desarrollo que sigue, se considera perfectamente conocida la teoría de funcionamiento de estas máquinas, como asimismo, sus formas constructivas.

#### 12.1. Algunas consideraciones teóricas

La frecuencia de las corrientes alternas que produce un alternador, están vinculadas a la velocidad de giro por medio de la conocida expresión:

$$f = \frac{Np}{60} \quad (101)$$

en donde:  $f$  = frecuencia, en [ciclos/segundo]

$N$  = velocidad de giro, en [RPM]

$p$  = número de pares de polos del rotor

Con ayuda de esta fórmula se puede construir la siguiente tabla para 50 [c/s];

Número de polos	2	4	6	8	10	12	14	16	20	24	32	40	48	64	80
Velocidad en RPM	3000	1500	1000	750	600	500	428,6	375	300	250	187,5	150	125	93,7	75

Para más de 10 polos, se suele encontrar que el número de polos es divisible por 4, y para más de 24 polos, suele ser divisible por 8.

Los alternadores empleados en las centrales, se conectan en la mayor parte de los casos en estrella, y el neutro se vincula a tierra, por las siguientes causas principales:

- Con el neutro a tierra, el sistema está estabilizado.
- La baja resistencia, impide la acumulación de cargas electrostáticas.
- Es posible colocar protecciones internas de tipo diferencial.

El neutro se conecta directamente a tierra, o muchas veces, por medio de una resistencia de valor bien establecido. En los generadores que alimentan directamente líneas de baja tensión, es preferible la instalación de la resistencia para evitar que las corrientes de cortocircuito sean de valor elevado. La resistencia actúa como un limitador. Pero de todos modos, la colocación de la resistencia para unir el neutro a tierra, deriva de un estudio del sistema de potencia.

En la figura 109 hemos dibujado a la izquierda el *circuito equivalente para una fase*, o *circuito sustitutivo*, de un alternador. Se supone que las tres fases

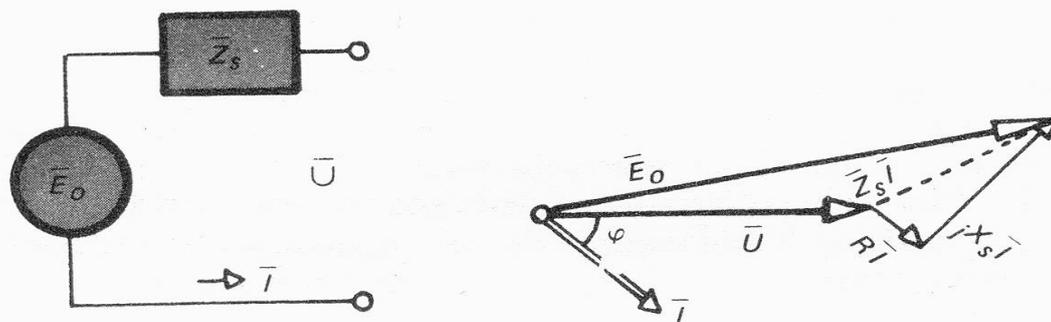


FIGURA 109

son iguales, en una máquina que no presenta averías o anomalías. El circuito equivalente tiene una fuerza electromotriz  $\bar{E}_0$  provocada por el flujo del entrehierro, en serie con una impedancia muy particular, llamada *impedancia sincrónica* y señalada con la letra  $\bar{Z}_s$ . En la parte derecha de la misma figura aparece el diagrama de fasores, o diagrama vectorial, o diagrama de vectores armónicos, de donde es posible deducir que la tensión en bornes por fase  $\bar{U}$  es la fuerza electromotriz  $\bar{E}_0$  a la que se le ha restado la caída interna de tensión  $\bar{I}\bar{Z}_s$ . La impedancia sincrónica es simplemente una forma cómoda de representar varios efectos, y no se trata de un número fijo, sino que su valor depende de las condiciones de servicio, asunto éste bien conocido en los estudios de la teoría del alternador. La parte resistiva de la impedancia sincrónica es en la mayor parte de los casos, un valor muy pequeño y se lo desprecia, de tal manera que podríamos escribir:

$$\bar{Z}_s = R + jX_s \cong jX_s \quad (102)$$

La *reactancia sincrónica*  $X_s$  tiene dos principales componentes: la *reactancia de dispersión*  $X_d$  correspondiente al flujo de una fase que no se concadena con el rotor, y otra parte  $X_l$  que es una reactancia ficticia que representa globalmente al efecto de la *reacción de armadura*. Podemos escribir:

$$X_s = X_d + X_l \quad (103)$$

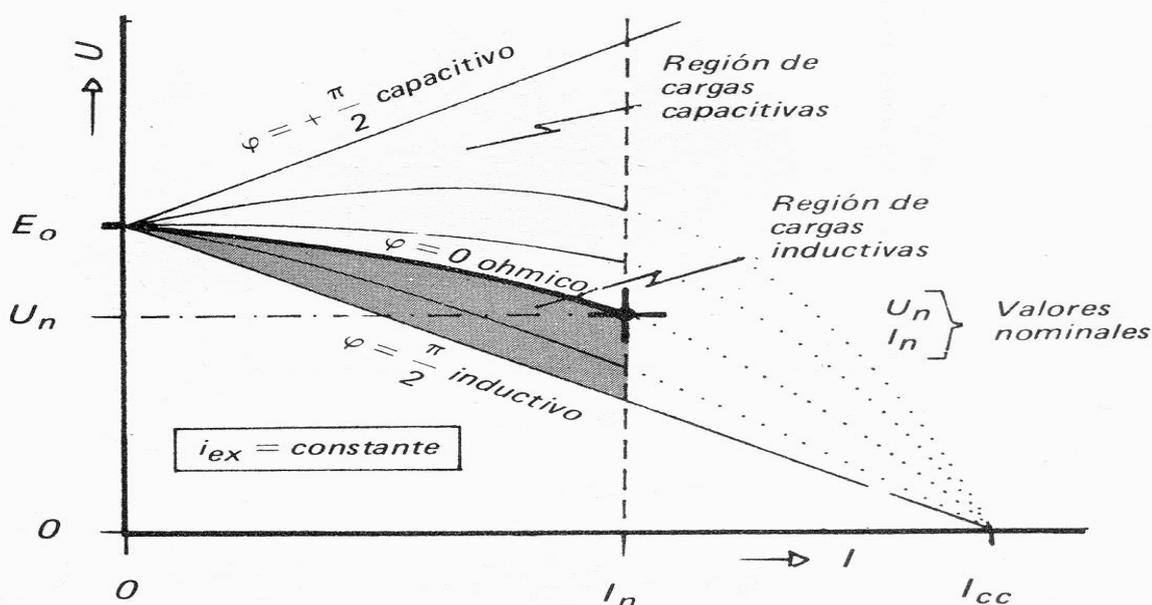


FIGURA 110

En base a la figura 109 parte derecha, podemos deducir en forma cualitativa la figura 110, que son las curvas características llamadas *características*

*exteriores*  $U = f(I)$  que representan la tensión por fase en función de la corriente de fase, todo ésto a excitación constante y tomando como parámetro el factor de potencia de la carga. Puede verse que para cargas ohmicas o reactivas-inductivas, la tensión en bornes tiene tendencia a decaer, mientras que para cargas reactivas-capacitivas, puede darse el caso de aumentos de la tensión en

bornes al cargar la máquina. En la figura 111 hemos dibujado las características generales que interesan en el estudio del alternador, y que no requieren mayor explicación para quien está familiarizado con la teoría de estas máquinas. La curva  $OHAE$  es la característica a vacío, que representa la tensión en bornes en función de la excitación, sin carga. Las curvas que parten del punto  $K$  y pasan por los puntos  $IB$  ó  $F$  son las características  $U = f(i_{ex})$  para  $I = Cte$ . En otro par de coordenadas, se dibujó la característica en cortocircuito, es decir, la corriente de una fase en función de la excitación, estando las tres fases cortocircuitadas y por lo tanto  $U = 0$ .

De esta última figura es posible calcular la *regulación* del alternador, o sea, la *caída porcentual* entre la tensión a vacío y a plena carga, para los diversos estados de carga y diversos factores de potencia. Por ejemplo, para  $\cos \varphi = 0,8$  inductivo y plena carga, resulta:

$$r = \frac{\overline{AB}}{\overline{BD}} \quad 100 \cong 40\% \quad (104)$$

Debemos agregar, por interesante, que los valores de las reactancias en los alternadores, y también en general en los sistemas de potencia, se suelen expresar porcentualmente, o como también se dice, por unidad ( $PU$ ), en base a la *reactancia nominal*  $E_0/I_n$ . Tomando el diagrama vectorial de la figura 109

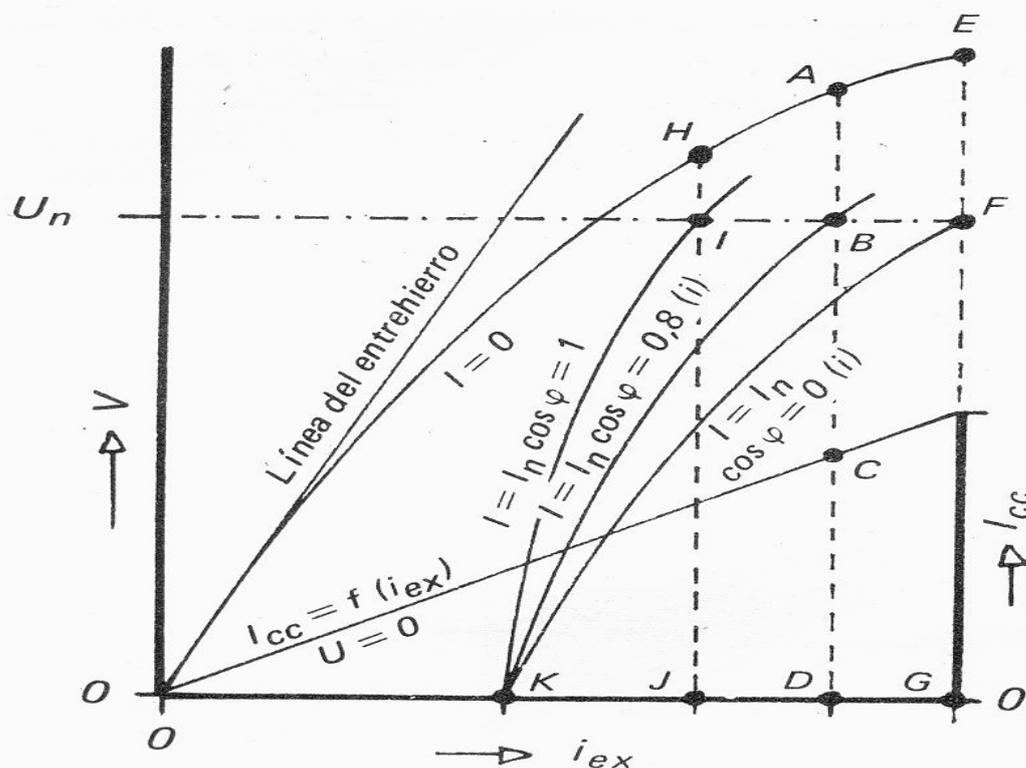


FIGURA 111

podemos escribir:

$$\% X_s = \frac{I_n X_s}{E_o} 100 \quad (105)$$

De la figura 111 es posible determinar la reactancia sincrónica no saturada en base a:

$$X_s = \frac{U_n}{I_{cc}} = \frac{\overline{BD}}{\overline{CD}} \quad (106)$$

Como las determinaciones provienen de ensayos diferentes, el valor de  $X_s$  no es exacto, pero suficiente en muchos casos. Debemos agregar que los valores de las reactancias, deben tomarse simples o compuestos, según se trate de alternadores a rotor liso o de alternadores a polos salientes.

En el estudio de los sistemas eléctricos de potencia, es muy importante el comportamiento de la reactancia sincrónica durante los fenómenos de corto circuito. Para ello tomamos la figura 112 que representa los principales elementos en juego en un alternador trifásico, y se simbolizó, inmediatamente a la salida del alternador, una falla total que une los tres conductores de la red por medio de una resistencia nula. Para los razonamientos que siguen, se supone provisoriamente que la corriente continua de excitación  $i_{ex}$  permanece constante. En la figura 113 mostramos con más detalles los aspectos más salientes del fenómeno transitorio que ocurre inmediatamente después del corto circuito. En las partes (a) (b) (c) de la figura citada se indica, para cada fase, en la parte izquierda, el diagrama vectorial, reforzando en el dibujo la fase de que se trata en

cada caso. Enseguida, a la derecha de esos vectores, aparece la onda de la tensión de la fase que se analiza, y que se interrumpe en el momento del corto-circuito. Es evidente que, después de este fallo, la tensión de todas las fases pasa a ser nula. Para comprender lo que ocurre hay que tener presente que

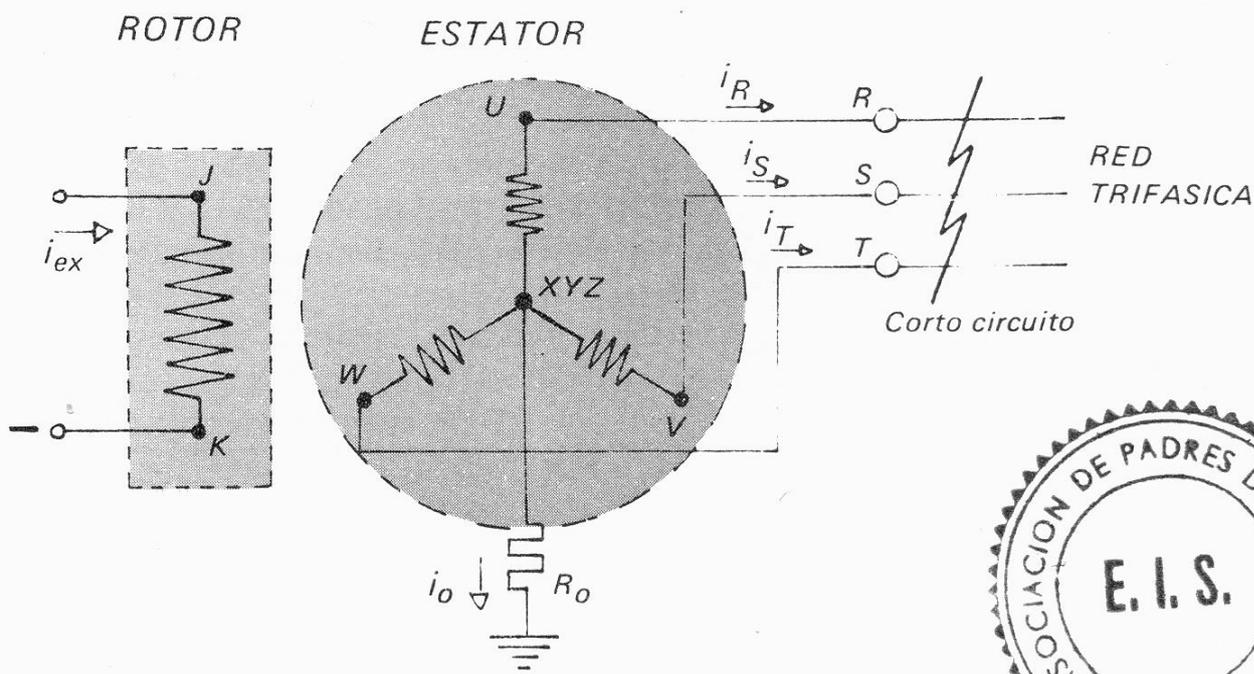
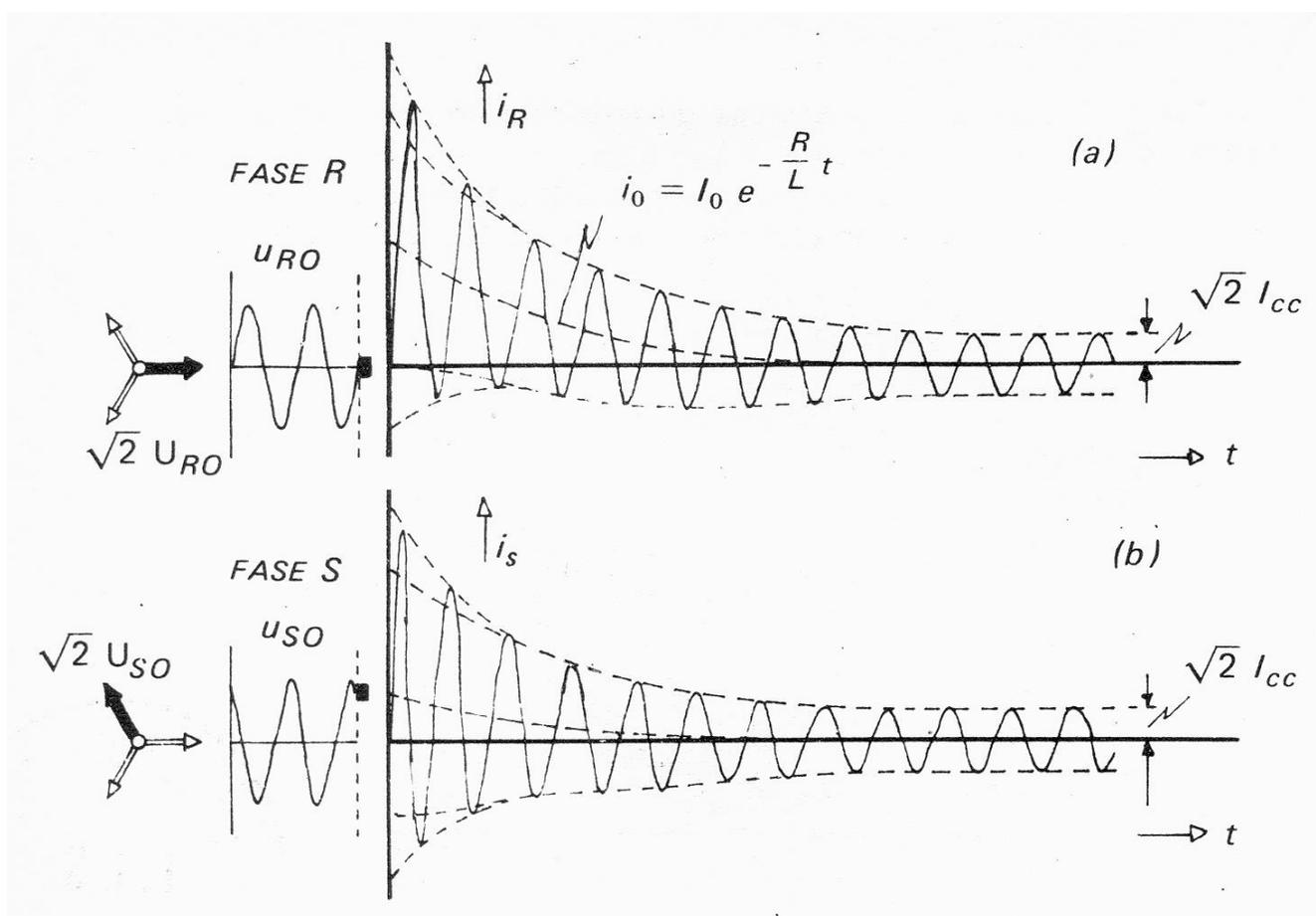


FIGURA 112



al quedar todas las fases en corto, el circuito equivalente de la figura 109 al que nos referimos anteriormente, queda cerrado sobre sí mismo. Debido a lo exiguo de la resistencia, ese circuito cerrado sobre sí mismo es de naturaleza totalmente inductiva, y la corriente atrasará  $90^\circ$  respecto a la fuerza electromotriz generada.

En la figura 113 hemos supuesto, porque no ocasiona complicaciones conceptuales, que en el momento de producirse el corto circuito, la máquina estaba trabajando a tensión nominal, pero a vacío. Por lo tanto, en la fase R, al ser nula la tensión en el momento de la falla, el flujo magnético ocasionado por el rotor en esa fase, era de valor máximo. Sabemos que el flujo está  $90^\circ$  adelantado respecto a la tensión que genera. El circuito de la fase tratará, por lo que sabemos de la Electrotecnia Básica, de mantener su situación por simple razón de inercia (Ley de Lenz). Pero es evidente que al producirse el corto circuito aparecerá la reacción de armadura, es decir, el flujo del estator en forma de campo rotante. El circuito en estas condiciones es totalmente inductivo, ya que, recordemos, los amper-vuelta de la reacción de inducido quedan prácticamente en oposición con los amper-vuelta de la excitación principal de la rueda polar. Por lo tanto, inmediatamente después del momento del corto, el flujo en el entrehierro que penetra por las bobinas del estator comenzará a decaer por disminución de la fuerza magneto motriz, y como esas bobinas tratarán de mantener su situación magnética, por lo dicho anteriormente, deberá aparecer un fenómeno transitorio semejante al que ocurre en una simple bobina con corriente continua a la que se desconecta. Es de esperar entonces, que en la bobina de esta fase que estamos tratando aparezca una corriente unidireccional.



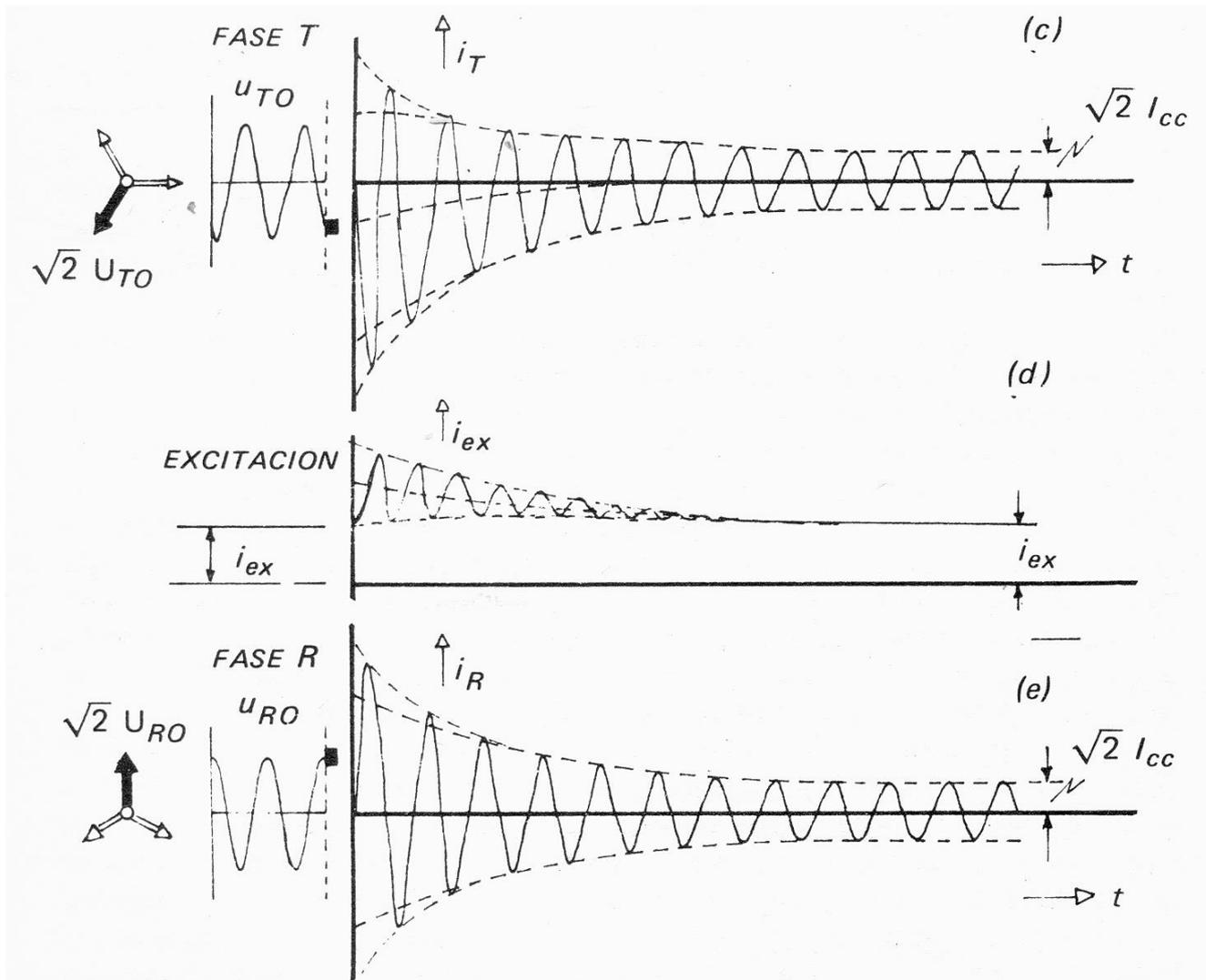


FIGURA 113

componente continua, cuya ley será del tipo:

$$i_o = I_o e^{-\frac{R}{L}t} \quad (107)$$

Pero además de la componente continua, no debemos olvidar que en el momento de producirse el corto, solo existía la fuerza magnetomotriz de la rueda polar, debido a que la reacción de armadura desmagnetizante todavía no tuvo tiempo de establecerse, y en consecuencia, el único freno a las corrientes es la reactancia de dispersión, de valor menor que la reactancia sincrónica como se verifica con la (103). Por lo tanto, debe aparecer una *componente alterna* superpuesta al valor de continua. Pero es necesario agregar algo más. En el momento de producirse el corto, solo existía en la rueda polar el flujo de valor constante producido por la corriente continua de la excitación. Un momento después, hace su aparición el flujo de la reacción de armadura, parte del cual (descontada la dispersión) penetra en el rotor, en donde existe no sólo el arrollamiento excitador *J-K* (Figura 112) sino también arrollamientos compensadores o jaulas de amortiguamiento de oscilaciones, y piezas polares que pueden ser macizas y sede de corrientes parásitas. Todos estos fenómenos auxiliares, en conjunto, se comportan como un transformador en corto circuito desde el punto de vista eléctrico, y acentúan los efectos de la componente alterna. Es por esta razón que en la parte (a) de la figura 113 la envolvente de la onda de la corriente  $i_R$  tiene una desviación que aumenta su valor, para los primeros ciclos

del corto circuito. Para las fases  $S$  y  $T$  de la misma máquina, las corrientes  $i_S$  y  $i_T$ , las partes (b) y (c) de la figura 113 muestran que el fenómeno es similar, pero la componente de continua es más atenuada en razón de que al producirse el corto, la fuerza electromotriz inducida no pasa por cero, y el flujo de la rueda polar no es máximo para esas fases. Si el fallo se hubiese producido cuando los vectores están en la posición indicada en la parte (e) de la figura 113, no habría en la fase  $R$  componente continua, y el transitorio sería simétrico respecto al eje de los tiempos, como se aprecia en la citada figura, pero no así las otras dos fases (que no se dibujaron). En la parte (d) de la misma figura, aparece la corriente en el circuito de excitación, que pese a ser continua, sufre los efectos del transitorio, porque recibe las variaciones del flujo del estator durante el establecimiento del nuevo régimen. Se observa, que pasado cierto tiempo desde que ocurrió el accidente del corto, las tres fases recuperan la normalidad en lo que a simetría de ondas se refiere, pero con un valor eficaz por fase determinado por la siguiente fórmula:

$$I_{cc} = \frac{E_o}{X_s} \quad (108)$$

Este valor se suele denominar *corriente de corto circuito permanente*, o *corriente de corto circuito sostenida*, de valor superior a la nominal de la máquina. No obstante, por problemas generales que se estudian en sistemas eléctricos de potencia, las peores condiciones se producen en los primeros ciclos después del corto circuito, y todos los estudios deben tener en cuenta esta situación.

Con la figura 113 podemos apreciar que la componente de corriente continua  $I_o$  debe ser de valor absoluto igual al valor absoluto máximo de la componente alterna, para el momento de  $t = 0$ , y de sentido opuesto, para satisfacer la lógica condición de corriente  $i_R = 0$  para ese momento. Por lo tanto, el valor eficaz de la corriente total inmediatamente después del corto circuito, debe ser igual a la raíz cuadrada de la suma del valor inicial de corriente continua, más el valor eficaz inicial de la componente alterna, ambas al cuadrado, o sea:

$$I_i = \sqrt{[\sqrt{2}I_o]^2 + I_o^2} = \sqrt{3}I_o \quad (109)$$

La condición recién expuesta, puede dejarse expresada por medio de:

$$I_o = \frac{1}{\sqrt{2}} I_a \quad (110)$$

siendo  $I_o$  como ya vimos la componente continua (valor máximo inicial), y  $I_a$  el valor eficaz de la componente alterna en el momento  $t = 0$ .

Pero hemos hablado del distinto comportamiento de la reactancia del circuito de una fase para el momento inicial del corto. Si no tenemos en cuenta el efecto de la jaula amortiguadora y de los polos macizos, la única reactancia que se presenta a la corriente alterna en el momento de iniciarse el fenómeno, es la reactancia de dispersión  $X_d$ , ya que la otra componente de la reactancia sincrónica, el valor  $X_I$  aparecerá más tarde y determinará finalmente la reactancia sincrónica final. Al valor de la reactancia que se presenta en esas condiciones, se la llama *reactancia transitoria*, y su valor es casi igual al de la reactancia de dispersión de una fase, o sea:

$$X' = X_d \quad (111)$$

Si tenemos en cuenta los fenómenos citados de efecto de transformador de la jaula amortiguadora, la reactancia es todavía menor, y se la llama *reactancia subtransitoria*, denominándola con el símbolo  $X''$ . Por lo tanto, si tomamos la (109) y reemplazamos la corriente  $I_o$  por el valor eficaz de la componente alterna en el momento de iniciarse el transitorio, se tiene:

$$I_i = \sqrt{3} I_o = \sqrt{3} \frac{E_o}{X''} \quad (112)$$

y si nos referimos al valor de la corriente nominal

$$I_i = \frac{\sqrt{3} I_N}{\frac{I_N X''}{E_o}} \quad (113)$$

Por lo tanto, resumidamente, podemos decir que cuando se pone en corto circuito un alternador trifásico, las primeras oscilaciones (del orden de 1 hasta 6 períodos) tienen una amplitud determinada por la reactancia subtransitoria, luego siguen oscilaciones limitadas por la reactancia transitoria, para finalmente quedar las oscilaciones limitadas por la reactancia sincrónica. El pasaje de una forma de comportamiento a otra se hace a través de funciones del tipo exponencial, en donde juegan papel preponderante la resistencia y la reactancia de los bobinados de las fases del estator y del circuito de excitación, sumado a las mismas características de la jaula amortiguadora. Esto último queda definido usualmente, mediante el uso de *constantes de tiempo* que pueden determinarse. A todo lo dicho, debe sumarse que en los razonamientos anteriores se ha supuesto constante la corriente de excitación  $i_{ex}$  que proviene del sistema de excitación del alternador, asunto que en la práctica no es así. Todos los alternadores están provistos de sistemas o mecanismos que se encargan de regular la corriente continua de excitación  $i_{ex}$  acordes con las variaciones que se producen, y en forma de asegurar una tensión constante en bornes del generador, y que en caso de corto circuito, deben proceder a desexcitar lo más rápidamente posible.

A la reactancia sincrónica  $X_s$ , reactancia transitoria  $X'$  y reactancia subtransitoria  $X''$  que se presentan en un alternador por fase, debe agregarse el uso de la *reactancia de secuencia inversa*  $X_2$  que es el valor correspondiente a un sistema de secuencia negativa establecido en el bobinado del estator, de frecuencia doble, y finalmente la *reactancia homopolar*  $X_o$  que presentan las bobinas a la componente de secuencia cero. Estos dos últimos valores permiten introducir a los alternadores en los cálculos de conjunto de los sistemas eléctricos de potencia, a fin de estudiar el comportamiento de las redes bajo muy diversas condiciones de servicio, y mediante el uso de las componentes simétricas.

## 12.2 Enfriamiento de los alternadores

El alternador, como toda máquina eléctrica, tiene pérdidas que se transforman en calor y que globalmente podemos expresar del siguiente modo:

$$P_o = P_{Cu} + P_{Fe} + P_{Ex} \quad (114)$$

donde:  $P_o$  = pérdidas totales

$P_{Cu}$  = pérdidas en el cobre =  $3 R I^2$

$P_{Fa}$  = pérdidas en el hierro

$P_{Ex}$  = pérdidas en el sistema excitador

Estas pérdidas deben ser evacuadas por los medios habituales para mantener la temperatura dentro de los límites tolerados por las normas, y en las potencias habituales en las centrales eléctricas, se han hecho comunes diversos sistemas de enfriamiento. Podemos citar los siguientes:

- Refrigeración en circuito abierto
- Refrigeración en circuito cerrado
- Refrigeración por medio de aire
- Refrigeración por medio de hidrógeno
- Refrigeración con líquidos
- Refrigeración directa
- Refrigeración indirecta

Como se comprenderá, todos estos métodos se emplean en la medida que el diseño de la máquina conduzca a su necesidad de utilización. La refrigeración en circuito abierto, toma aire del exterior, lo impulsa a través de los órganos principales, y lo expulsa posteriormente. En circuito cerrado, en vez, el aire es enfriado y vuelto a introducir en la máquina. En la mayor parte de los casos de circuito cerrado, el aire sufre un filtrado en su recorrido, sea por medio de filtros secos como de filtros húmedos. Los sistemas de circuito cerrado son muy empleados en las grandes unidades, dado que disminuyen la cantidad de impurezas en circulación, no presentan peligros de incendio, y pese a tener más órganos en el sistema, suelen ocupar menos espacio en conjunto. El medio refrigerante, sea aire como hidrógeno, circula dentro de la máquina por el entrehierro entre rotor y estator, y por los canales de ventilación que el mismo diseño ha previsto para ello.

Dentro de los generadores, los de tipo a rotor de polos salientes, por su forma constructiva, tienen más superficies en contacto con el medio ambiente, y permiten una mejor evacuación del calor. Pero en los generadores de rotor liso, particularmente los turbogeneradores de gran capacidad, son de pequeña superficie de evacuación, y por lo tanto, la refrigeración debe ser mucho más enérgica. Por ello es que los generadores de las centrales hidroeléctricas, generalmente de baja velocidad y gran diámetro, se enfrían por aire, y los turbogeneradores de las centrales a vapor de gran tamaño, se refrigeran por medio de hidrógeno. Este gas presenta la ventaja, frente al aire, de tener menor peso específico, mucho mayor coeficiente de conductibilidad del calor, y mayor coeficiente de convección. La desventaja es su capacidad oxidante actuando sobre los aislantes, y ser combustible. El precio del hidrógeno no impide su utilización. El peso específico es aproximadamente 14 veces menor que el del aire, y por lo tanto, las pérdidas que ocasiona al circular por los conductos y canales de ventilación, es sensiblemente menor. Se necesitan potencias comparativamente menores en los ventiladores y sistemas de impulsión del medio refrigerante. Al ser casi 7 veces más conductor del calor que el aire, el hidrógeno produce una evacuación del calor más enérgica, y en consecuencia, se pueden obtener temperaturas de servicio más bajas, o inversamente, a igual potencia, se pueden tener dimensiones menores en todos los órganos del alternador afectados por el enfriamiento bajo este gas. El pequeño aumento de precio a causa del uso del hidrógeno, queda largamente compensado por la disminución de peso total, sumado a que mediante este refrigerante, se pueden alcanzar las mayores potencias. Además, al no tener oxígeno (como lo tiene el aire), los aislantes no sufren oxidaciones que reducen su vida útil. El peligro de explosión, al mezclarse el hidrógeno con el

reducen su vida útil. El peligro de explosión, al mezclarse el hidrógeno con el oxígeno del aire, obliga a la adopción de protecciones especiales, y a la verificación de la composición del gas, asunto no complicado. Las inevitables pérdidas de hidrógeno a través de las juntas y otros empalmes, se compensa por medio de una adecuada reserva en botellones. En grandes unidades, se han desarrollado sistemas de enfriamiento por agua pura, que presentan ventajas.

Acotemos que una buena cantidad de generadores trabajan con circuitos cerrados de aire o de hidrógeno, y poseen además, enfriadores a base de agua que permiten al fluido empleado entregar el calor de las pérdidas. El agua puede provenir de diversas fuentes, y en las centrales hidroeléctricas es de fácil obtención. La circulación del aire o del hidrógeno en el circuito cerrado, se efectúa por medio de ventiladores centrífugos acoplados en el mismo eje de giro del rotor, o colocados adecuadamente en el trayecto del gas.

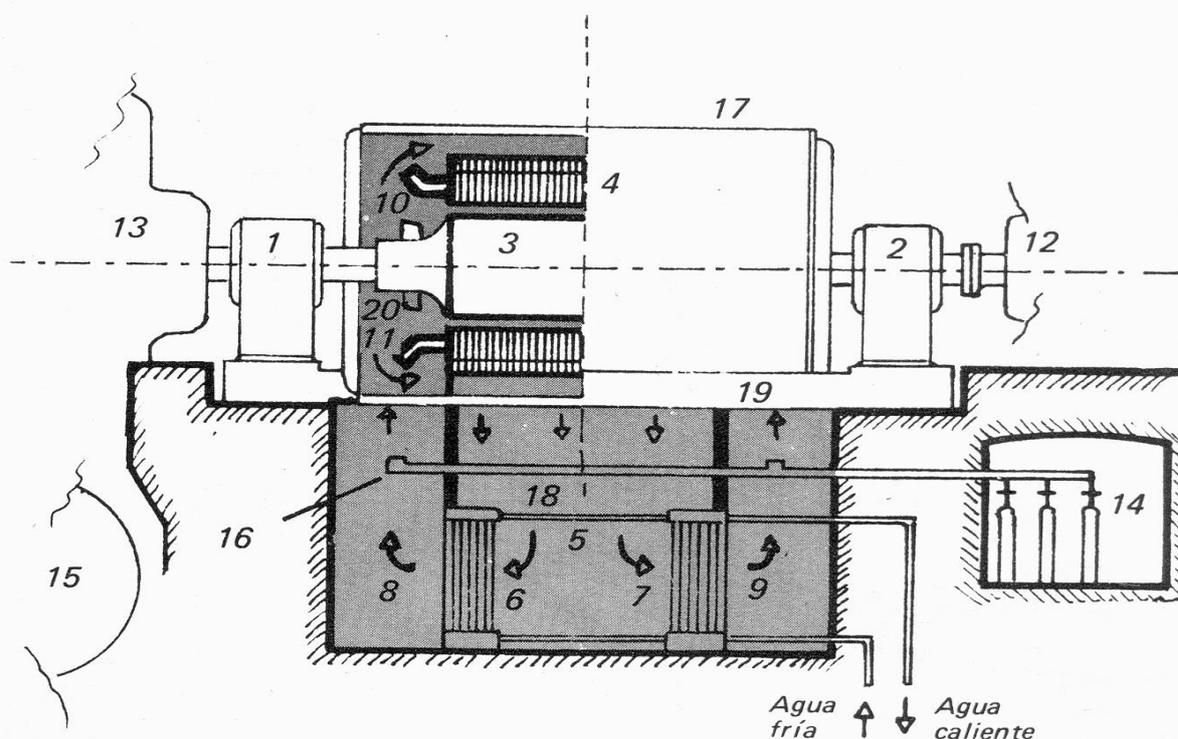


FIGURA 114

Las referencias de esta figura son las que siguen:

1. Cojinete del lado turbina
2. Cojinete del lado excitatriz
3. Rotor liso
4. Estator, con las bobinas y canales radiales de ventilación
5. Conducto de regreso del aire caliente del alternador
- 6.7. Refrigeradores por agua
- 8.9. Salida de aire enfriado para el alternador
- 10.11. Cabezas de bobinas del estator
12. Excitatriz
13. Turbina

14. Depósito de CO<sub>2</sub>
15. Condensador
16. Inyectores de CO<sub>2</sub>
17. Carcasa del alternador
18. Tubería del CO<sub>2</sub>
19. Base del alternador
20. Ventilador del rotor, lado izquierdo

Para formarnos una idea sobre la disposición de los sistemas de enfriamiento, examinemos la figura 114 que contiene además el sistema de extinción de incendio. Se trata de un turboalternador refrigerado por aire en circuito cerrado, con enfriadores de agua. El aire penetra por los dos extremos y es accionado por dos ventiladores acoplados directamente al eje. Por la presión recibida, pasa una parte por el entrehierro de la máquina y por otra ingresa a la

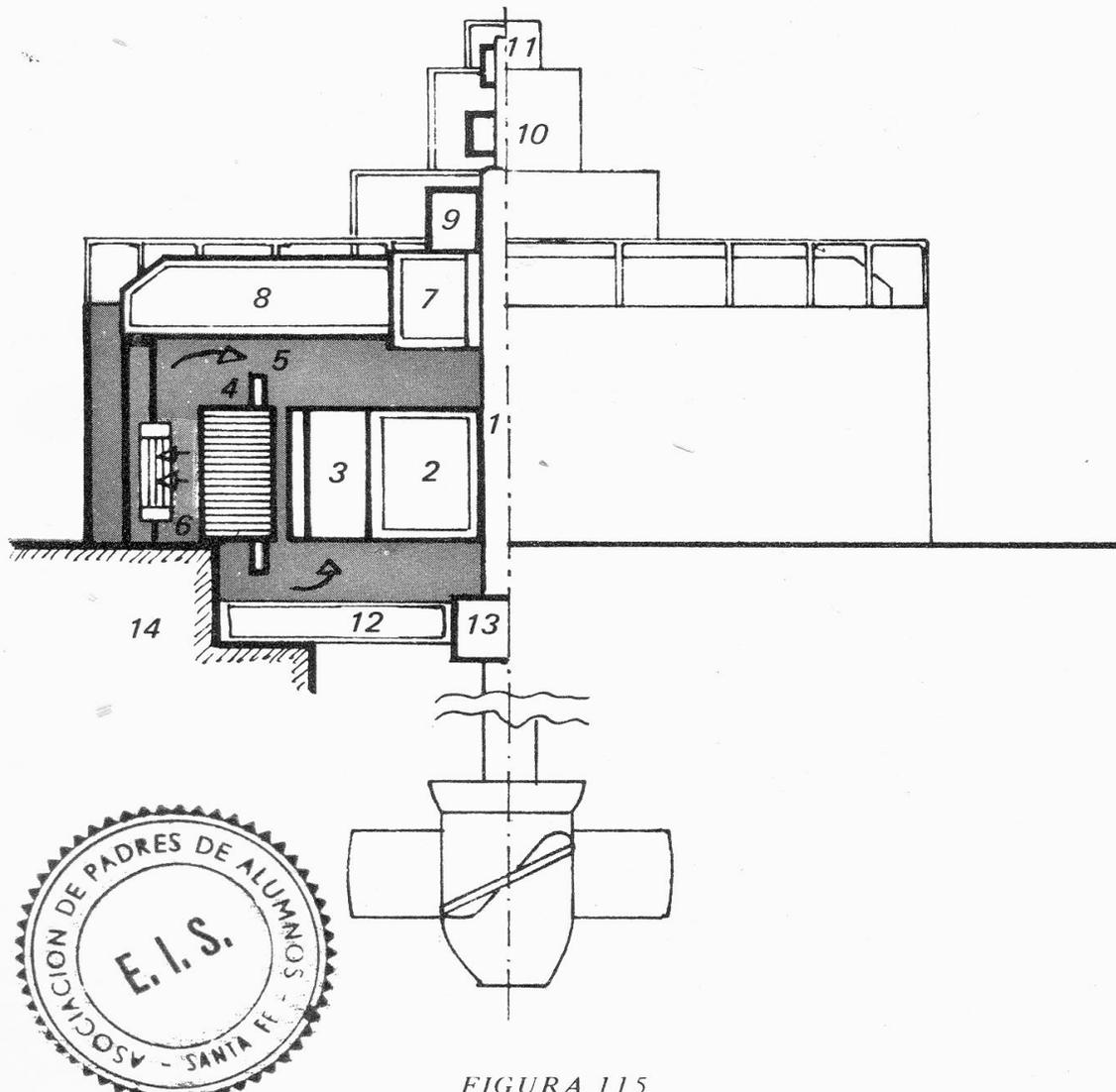


FIGURA 115

parte exterior del estator, pasa por sus canales radiales, y llega al rotor, para finalmente salir por la parte central en un camino adecuadamente diseñado, para ingresar al sistema de enfriamiento por agua. El sistema es simétrico, y por los dos extremos ingresa aire frío.

En la figura 115 podemos apreciar el corte de un alternador de eje vertical para central hidroeléctrica. En estas máquinas, la refrigeración se hace casi exclusivamente por aire, el que es enfriado a su vez por agua mediante radiadores colocados en el contorno de la carcasa. Las referencias de

parte exterior del estator, pasa por sus canales radiales, y llega al rotor, para finalmente salir por la parte central en un camino adecuadamente diseñado, para ingresar al sistema de enfriamiento por agua. El sistema es simétrico, y por los dos extremos ingresa aire frío.

En la figura 115 podemos apreciar el corte de un alternador de eje vertical para central hidroeléctrica. En estas máquinas, la refrigeración se hace casi exclusivamente por aire, el que es enfriado a su vez por agua mediante radiadores colocados en el contorno de la carcasa. Las referencias de la figura 115 permiten apreciar la disposición, sin mayores explicaciones.

1. Eje vertical
2. Rueda polar
3. Corona de la rueda polar
4. Estator
5. Cabezas de bobinas del estator
6. Radiadores de enfriamiento
7. Cojinete principal de empuje
8. Vigas soporte, que se apoyan en los basamentos exteriores (araña)
9. Excitatriz principal
10. Excitatriz piloto
11. Alternador piloto.

### 12.3. Sistemas de excitación

Como hemos podido apreciar en la figura 110, al variar la corriente de carga  $I$ , si no se modifica la tensión, varía consecuentemente la tensión en bornes  $U$ . La calidad de un servicio eléctrico depende, entre otras cosas, de la constancia de la tensión, y por lo tanto, la regulación de la misma es un problema técnico de importancia. Las condiciones exigidas comportan una tensión de valor invariable en los bornes de los consumidores, cualquiera sea su importancia, y esto obliga a una corrección de los valores de las tensiones en muy diversos puntos de una red eléctrica. Las diferentes longitudes de las líneas causan distintas caídas de tensión, por lo que hay que regular a la salida de esas líneas en forma adecuada para lograr en el extremo, la constancia exigida. Esas regulaciones parciales se logran por medio de reguladores incorporados a los transformadores, pero de todos modos, a la salida de la central, la energía eléctrica debe ser de tensión constante, para que las diversas alimentaciones puedan a su vez regular sus salidas a partir de una tensión constante tomada como base.

Si bien, con estas reflexiones no queda agotado el tema de la regulación de la tensión en redes, hemos procurado evidenciar que la tensión entregada por un generador debe ser lo más constante posible. El diagrama de la figura 109 a la derecha, nos hace ver que para lograr una tensión  $U$  de valor constante en módulo, cuando cambia el módulo de la corriente  $I$  y el factor de potencia  $\cos \varphi$ , debemos maniobrar con la fuerza electromotriz inducida  $E_o$ . Para acomodar el valor del módulo de  $E_o$  a las continuas variaciones de carga y de factor de potencia que ocurren en toda red de servicios públicos o de tipo industrial, es necesario accionar constantemente sobre la corriente de excitación del generador, es decir, la corriente continua que entra al rotor y provoca los

polos que giran. Antiguamente, o en máquinas de muy baja potencia, esta operación la puede efectuar una persona, pero en la gran mayoría de los generadores, es necesario un mecanismo de accionamiento automático. La figura 111 ya nos mostró la influencia de la excitación sobre la tensión en bornes, cuando la carga es variable y también el factor de potencia, y si deseamos acomodar la fuerza electromotriz  $E_0$  en cada momento, para que compuesta con la caída de tensión  $\overline{IZ}_s$  nos suministre una tensión  $U$  de módulo constante, es necesario registrar las variaciones de tensión y de corriente, junto con su desfase, y con esos valores, ajustar la corriente de excitación  $i_{ex}$  para que produzca los efectos deseados. Estas ideas están estrechamente asociadas a lo que comunmente se denomina un sistema realimentado, que procuramos esquematizar en la figura 116. Del alternador sale la red que es menester controlar, con sus valores característicos. Un "detector" marcado con la letra "D" en la figura toma nota de su "estado" en cada momento, y elabora una

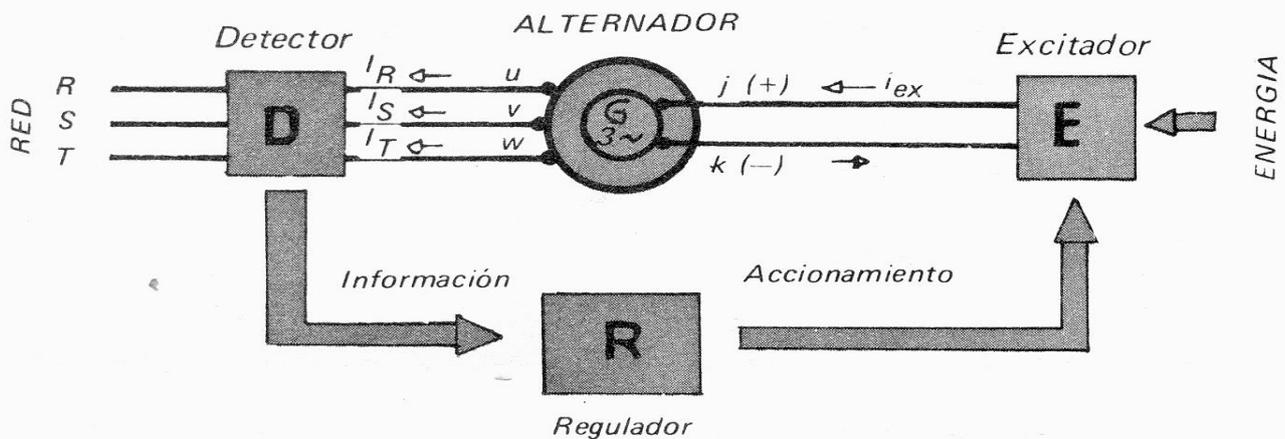


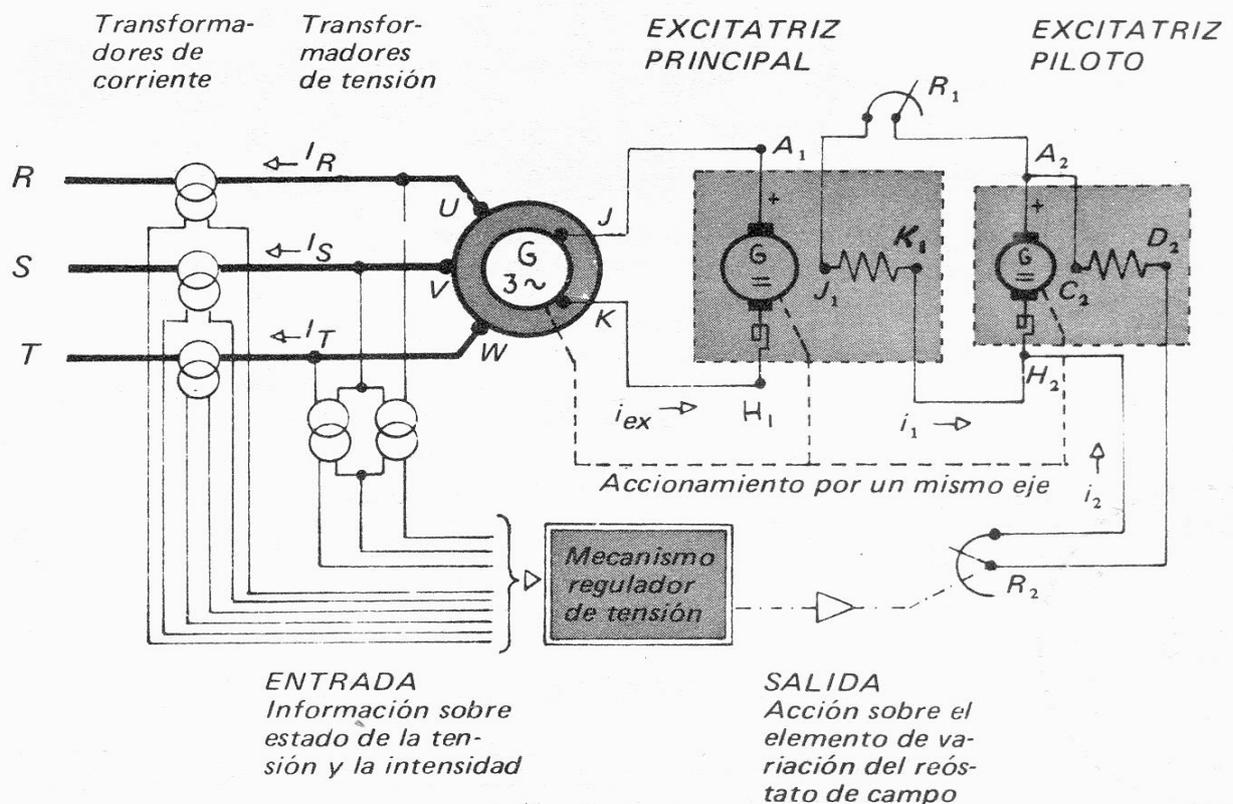
FIGURA 116

"información" adecuada que entrega a un dispositivo "regulador" señalado con "R". Este último, conforme a un "programa" que su misma naturaleza técnica implica, produce una "salida" hacia el "sistema de excitación" denominado "E". Este último componente recibe energía que transforma en corriente continua  $i_{ex}$ , la que es regulada conforme las "indicaciones" de la "salida" del "regulador". Recalcamos que muchas de las expresiones usadas se han puesto entre comillas, porque comportan un vocabulario simplificador extraído de otras tecnologías. El sistema es realimentado, porque toma información de la salida, la elabora, y la aplica a la entrada para lograr que la salida tenga una cualidad característica.

Los mecanismos reguladores marcados con "R" en la última figura pueden ser diversos, respondiendo a tecnologías y patentes diferentes, y se encuentran en constante evolución. Por escapar a las pretensiones de este texto, no los habremos de desarrollar, y nos circunscribiremos a la funcionalidad de los sistemas de excitación.

En la figura 117 podemos apreciar el esquema de conexiones de un sistema que podemos llamar "clásico". El alternador tiene su mismo eje acoplado a dos máquinas de corriente continua que giran conjuntamente. A la salida, dos transformadores de tensión, y tres transformadores de corriente, se encargan de detectar el estado de la tensión y de la corriente a la salida, por intermedio de magnitudes adecuadamente reducidas. En algunos casos, los transformadores de medida pueden ser menos. Los dos de tensión estarán conectados en "V", que como sabemos, es un arreglo de conexiones que permite hacer una transformación trifásica por medio de dos transformadores monofásicos. Pero, lo en

definitiva interesante, es que al Mecanismo Regulador de Tensión llega la información de las tres corrientes y de las tres tensiones producidas por la máquina principal. Este aparato actúa sobre la corriente de excitación  $i_2$  de la llamada "excitatriz piloto" que pasa por el campo en derivación  $C_2-D_2$  controla la tensión generada en los bornes  $A_2-H_2$ . Esta última tensión se aplica al campo de la "excitatriz principal", que es de excitación independiente, por su campo  $J_1-K_1$ . Así se logra controlar la tensión en bornes  $A_1-H_1$  por medio de la corriente de excitación  $i_1$ , y consecuentemente, la corriente principal de excitación  $i_{ex}$  que se aplica al alternador por intermedio de los anillos rozantes. Muchas variantes sobre este esquema se pueden encontrar, ya que en vez de la excitatriz piloto puede haber solamente una máquina como la excitatriz principal. El reóstato  $R_2$  que controla todo el fenómeno, puede estar incorporado al Mecanismo Regulador de Tensión, y el reóstato  $R_1$  permite el ajuste inicial o puesta a punto del sistema. En algunos casos, tanto la excitatriz principal como la excitatriz piloto, pueden verse accionadas por medio de un



motor de corriente alterna trifásica. Pero partiendo de la idea que la corriente  $i_{ex}$  se extrae de una máquina de corriente continua con excitación independiente, que es el fundamento, es posible regular la corriente  $i_1$  con métodos más convenientes, aún cuando a veces, más caros. Los reactores a núcleo saturado son un ejemplo.

En la figura 118 podemos apreciar otra forma de resolver el problema de la excitación. El alternador no presenta diferencias con respecto al caso anterior, pero muy diferente es el grupo excitador. La corriente principal  $i_{ex}$  se extrae de un grupo rectificador que a su vez se alimenta de un alternador. El rectificador presenta en la figura una de las conexiones posibles, y tiene agregado un capacitor para limitar efectos de sobretensión y transitorios, y un resistor de descarga, elementos ambos que no hacen a la funcionalidad que estamos explicando, y solo resguardan a los diodos. A su vez, la excitación del alternador

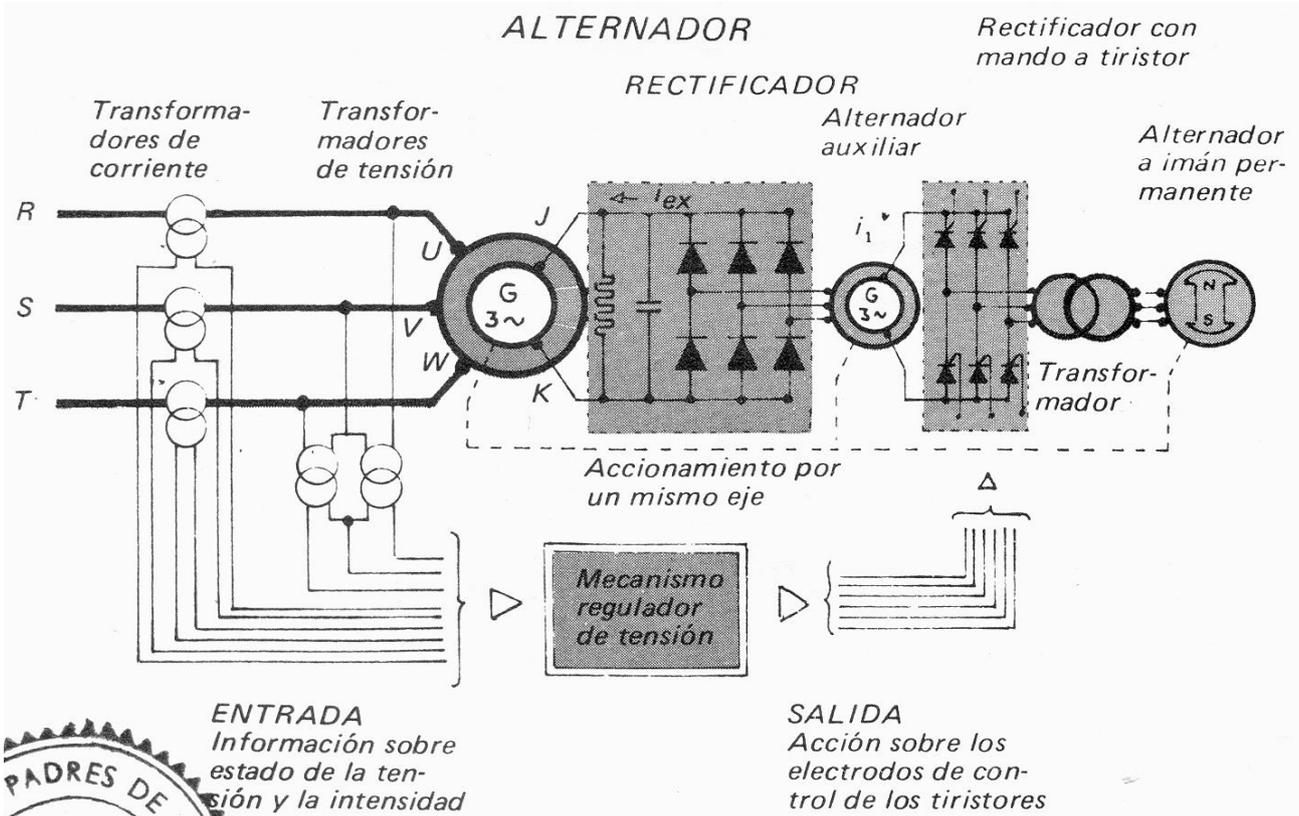


FIGURA 118



**ALTERNADOR** Rectificador controlado

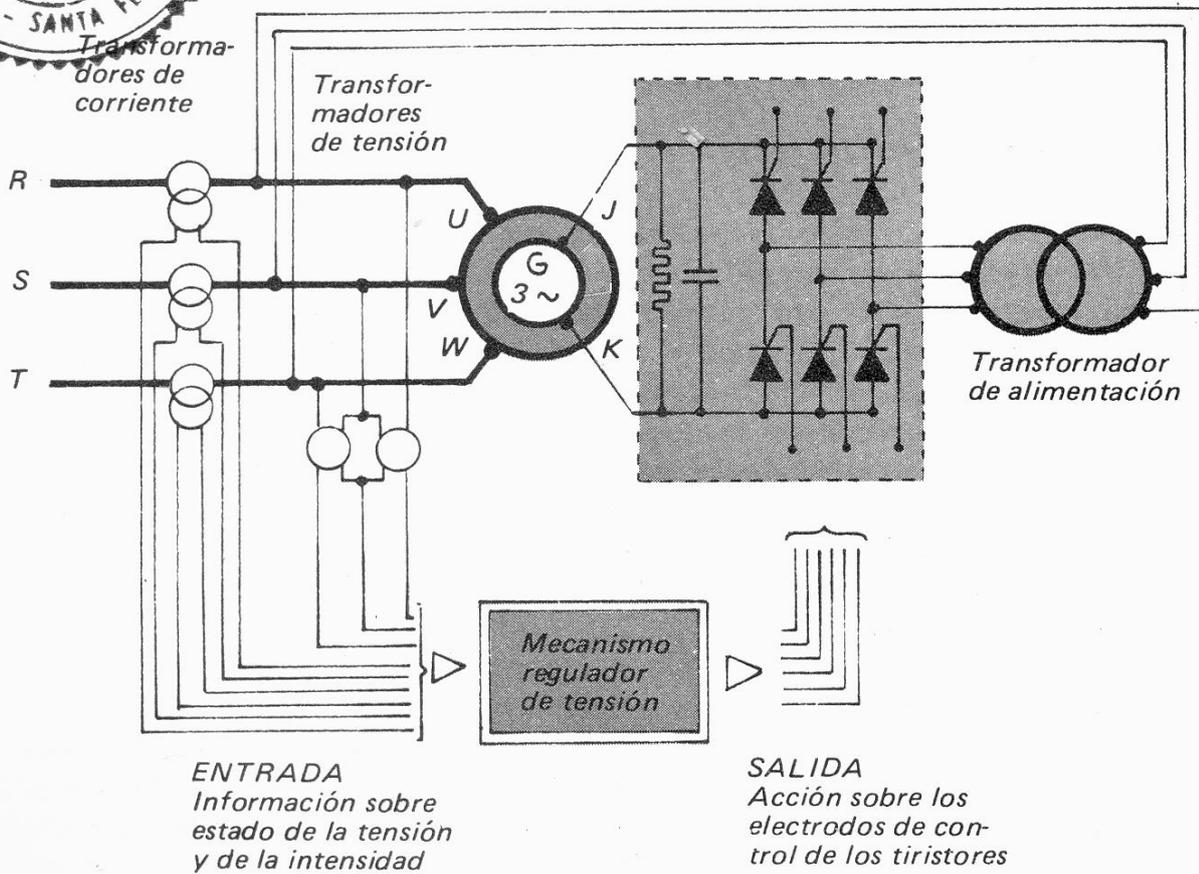


FIGURA 119

auxiliar proviene de otro rectificador que tiene mando por electrodo auxiliar, tratándose entonces de un tiristor. Este último recibe corrientes alternas de un generador a imán permanente, que suministra las mismas por medio de un transformador intermedio que adapta tensiones. Los tres alternadores, el principal y los dos auxiliares, se accionan por medio de un mismo eje. Este conjunto tiene la ventaja de que no cuenta con máquinas generadoras de corriente continua, con lo que se han evitado los colectores que requieren mantenimiento y son frecuente fuente de desperfectos. A su vez, la regulación a través de elementos de estado sólido, sin órganos mecánicos en movimiento, es más rápida y más segura. El Mecanismo Regulador de

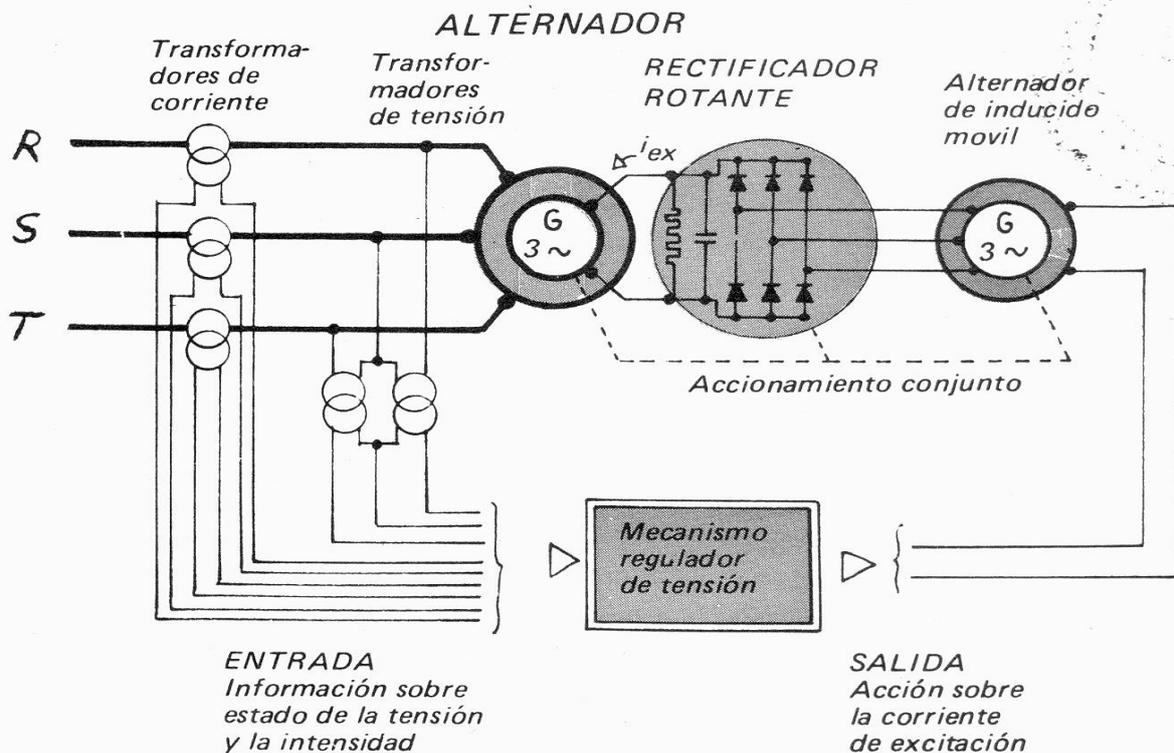


FIGURA 120

la Tensión se encarga de recoger información sobre corrientes y tensión, y accionar los dispositivos de “disparo” de los electrodos de compuerta de los tiristores en los momentos oportunos para lograr la conducción.

En la figura 119 tenemos el dibujo de un sistema en el que se han reemplazado las máquinas excitoras por un solo rectificador con mando por electrodo de compuerta (tiristor). También existe el capacitor y el resistor como en el caso anterior, para resguardo de los diodos. La alimentación de energía para el rectificador proviene de la misma máquina, por lo que podemos afirmar que se trata de un sistema “autoexcitado”. En estos métodos, el arranque, cuando todavía no hay tensión suficiente generada, implica la existencia de una red auxiliar de corriente trifásica, que es común en toda central importante. El circuito, no dibujado aquí, se completa con medios para lograr dicho arranque, y también permite cambiar y tomar energía del sistema auxiliar en vez de la propia máquina. Ver capítulo 17.2.

En todos estos sistemas, la corriente principal de excitación que ingresa al rotor del alternador, debe hacerlo por medio de los conocidos anillos rozantes. Mucho se ha estudiado como evitar estos elementos, llegando al llamado “alternador sin escobillas” que se ilustra en la figura 120. El ingreso de la corriente  $i_{ex}$  a los polos se hace directamente desde un conjunto rectificador que gira sujeto al mismo eje. Dicho conjunto recibe energía eléctrica alterna trifásica de un arrollamiento trifásico también giratorio, que es excitado a su vez

propia máquina. Ver capítulo 17.2.

En todos estos sistemas, la corriente principal de excitación que ingresa al rotor del alternador, debe hacerlo por medio de los conocidos anillos rozantes. Mucho se ha estudiado como evitar estos elementos, llegando al llamado "alternador sin escobillas" que se ilustra en la figura 120. El ingreso de la corriente  $i_{ex}$  a los polos se hace directamente desde un conjunto rectificador que gira sujeto al mismo eje. Dicho conjunto recibe energía eléctrica alterna trifásica de un arrollamiento trifásico también giratorio, que es excitado a su vez por polos fijos. El último alternador, al revés de los convencionales, es de rotor fijo e inductor móvil. De este modo, controlando la corriente de excitación del último alternador por medio de un sistema adecuado, se genera un conjunto de tensiones alternas trifásicas, las que se rectifican por medio de un sistema que gira conjuntamente con las bobinas en donde se produce la fuerza electromotriz, y del cual sale finalmente la corriente para el alternador principal. Con este método, se han eliminado los colectores y los anillos rozantes, y sólo hay que resolver el problema, no siempre fácil, de las sollicitaciones a que se ven sometidos los diodos rotantes.

#### 12.4. Algunos datos característicos

Los alternadores de las centrales eléctricas han alcanzado un alto grado de desarrollo, con potencias muy importantes. En nuestro país, la Empresa del Estado SEGBA tiene un alternador de 350 MW, y en el extranjero podemos encontrar alternadores de más de 1.000 MW para centrales nucleares, refrigerados por hidrógeno y por agua. Las posibilidades de construcción en potencias elevadas, están condicionadas muchas veces al transporte de la pieza más pesada, o más voluminosa, desde la fábrica hasta el lugar de emplazamiento. Los generadores destinados a ser accionados por turbinas a vapor o turbinas a gas, tienen corrientemente velocidades de 3.000 [RPM], aunque se pueden encontrar turboalternadores de 1.500 [RPM]. Las máquinas de alta velocidad son de poco diámetro y acentuado largo axial, mientras que los generadores destinados a centrales hidroeléctricas de baja velocidad, resultan de gran diámetro y baja longitud en el sentido del eje, con gran número de polos. La longitud axial de los turbogeneradores no puede aumentarse con facilidad, por la dificultad de alcanzar la parte central con el fluido refrigerante, y el diámetro de las máquinas lentas, contrariamente, no puede aumentarse sin encontrar tropiezos estructurales por los elevados esfuerzos a que se ven sometidas las piezas más alejadas del eje a causa de la fuerza centrífuga. Pero de todos modos, el volumen general de un alternador, que deriva directamente del volumen del rotor, es una cantidad bastante constante para una misma potencia aparente. Este hecho se puede demostrar acudiendo a una de las fórmulas que utilizan los diseñadores de máquinas eléctricas, que damos a continuación:

$$D^2 L = k \frac{S}{N} \quad (115)$$

donde:  $D$  = diámetro del rotor, en el entrehierro, en [cm]

$L$  = largo axial del rotor, en [cm]

$S$  = potencia aparente, en [kVA]

$N$  = velocidad, en [RPM]

$k$  = coeficiente función de  $\frac{S}{N}$ , que oscila entre  $55 \times 10^4$  y  $20 \times 10^4$

El coeficiente  $k$  disminuye cuando aumenta la fracción  $S/N$ , es decir, disminuye cuando disminuye la velocidad  $N$ . A potencia constante  $S$ , vemos que la fracción  $S/N$  aumenta cuando disminuye la velocidad  $N$  y el coeficiente  $k$  disminuye. Si bien no es posible afirmar categóricamente que el volumen resulta constante a potencia aparente constante, no es menos cierto que su variación no es sensible. Como a velocidades altas es menester reducir el diámetro  $D$  para limitar los esfuerzos centrífugos, las máquinas de esta característica son de largo axial apreciable.

Con relación al peso y las dimensiones, es interesante recordar los criterios de semejanza aplicables a las máquinas eléctricas, que podemos leer en la obra "Costruzione delle macchine elettriche" del Profesor Giovanni Someda, editorial Patrón, Bologna. Llamando con  $s$  a una dimensión lineal cualquiera, es evidente que el flujo de los circuitos magnéticos será proporcional a  $s^2$ , y por lo tanto, la tensión también. Por otra parte, la corriente de los circuitos eléctricos será igualmente proporcional a  $s^2$ . Como la potencia de la máquina será proporcional al producto de la tensión por la corriente, es evidente que la potencia será proporcional a la cuarta potencia de una dimensión lineal típica. Y por otra parte, el peso, por ser función del volumen, será función de la tercera potencia de una dimensión lineal típica. Surge así que el peso de una máquina eléctrica rotante, en general, es función del exponente  $3/4$  de la potencia aparente. Estos razonamientos permiten explicar la fórmula que encontramos en el "Manual del Ingeniero" por G. Colombo, Editorial G. Gili, Barcelona;

$$G = K \sqrt[4]{(P/N)^3} \quad (116)$$

donde:  $G$  = peso en [kg]

$P$  = potencia aparente, en [kVA]

$N$  = velocidad, en [RPM]

$K$  = coeficiente, según el tipo de máquina

Tipo de máquina	$K$	$K$ (extremos)	Observaciones
Alternadores pequeños y medianos	5.000	4.000 a 6.000	(4 a 12 polos) (menos de 1000 kVA)
Alternadores de gran potencia	8.000	6.000 a 10.000	
Alternadores de 2 polos	11.500	11.000 a 12.000	Refrigerados por aire
Alternadores de 2 polos	15.000	14.000 a 16.000	Refrigeración a hidrógeno

Según la misma fuente de información recién citada, existe una relación usual entre el peso del rotor y el peso total de la máquina, recién visto, que oscila entre 0,6 hasta 0,18, correspondiendo los valores altos para los alternadores lentos, y los valores bajos, para los turbogeneradores refrigerados con hidrógeno.

En cuanto a los sistemas de excitación, si se trata de máquinas de corriente

continua, es común que la potencia disminuya sensiblemente, a medida que aumenta la potencia del alternador. Por ejemplo, la potencia de una excitatriz para un alternador del orden de 10 [kVA] puede estar cerca del 7% de esa magnitud, mientras que para un alternador de gran potencia, alcanzará el 0,4%.

El rendimiento ha mejorado paulatinamente, y en las máquinas modernas es corriente encontrar valores del 98%. Otro factor importante es el momento de inercia, sobre todo para máquinas accionadas por turbinas hidráulicas. Recurriendo a "Conversión Industrial de la Energía Eléctrica", por M. Sobrevila, Editorial EUDEBA, Buenos Aires, apreciamos que el momento de inercia  $J$  es;

$$J = \frac{G D^2}{4g} \quad (117)$$

Donde:  $J$  = momento de inercia, en [kg-m<sup>2</sup>]

$G$  = peso de todas las piezas rotantes, en [N]

$D$  = diámetro de inercia (promedio), en [m]

$g$  = aceleración de la gravedad, 9,01 [m/s<sup>2</sup>]

La magnitud  $G D^2$  es un dato de fabricación.

Para completar esta breve lista de valores numéricos interesantes, recurrimos al "Electrical Transmission and Distribution Reference Book", por la Westinghouse Electric Corporation, a efectos de recopilar información sobre las reactancias de los alternadores. Así encontramos que para un turboalternador de 3.000 RPM la reactancia sincrónica  $X_s = 1,20$ , la reactancia transitoria  $X' = 0,15$  y la reactancia subtransitoria  $X'' = 0,09$ , valores todos según el método por unidad (PU), en base a la reactancia nominal  $E_o/I_n$ . Nótese que estas reactancias corresponden a máquinas a rotor liso. Para máquinas a rotor de polos salientes, será necesario determinar también las reactancias transversales o en cuadratura, que también aparecen en la fuente de información citada. Para los alternadores con polos salientes, estas mismas reactancias son algo mayores. Por ejemplo, con jaula amortiguadora,  $X_s = 1,25$ ;  $X' = 0,30$  y  $X'' = 0,20$ . Para el turboalternador del primer ejemplo, la reactancia de secuencia inversa resulta  $X_2 = 0,09$  y la homopolar  $X_o = 0,03$ . Todos los valores indicados, son promedio de los encontrados en una serie grande de máquinas, oscilando los límites aproximadamente en más o menos 20%.