

---

### 3.1. INTRODUCCIÓN.

Un sistema de excitación o un sistema de control de excitación es una combinación de aparatos diseñados para suministrar y controlar la corriente de campo del generador por medio de reguladores automáticos.

En la operación del sistema eléctrico en estado estable el sistema de excitación controla el voltaje generado, el cual deberá permanecer dentro de un rango de variación muy pequeño para las diferentes condiciones de operación, también es el medio para distribuir la potencia reactiva entre los generadores operando en paralelo. Los sistemas de excitación deberán además incluir durante los procesos transitorios, por lo que es importante considerar las características de los sistemas eléctricos y los requerimientos específicos en diferentes problemas.

El proceso básico de control de voltaje y los conceptos físicos involucrados donde un operador ejecuta las funciones de control siguiendo las lecturas de un voltímetro  $V_i$ . El proceso de control consiste en que el operador controla manualmente el reóstato  $R$  con la finalidad de mantener un Voltaje  $V_o$ . El valor de  $\Delta V$  puede ser leído en forma discontinua (con zonas muertas) o continuamente (proporcionalmente). En el primer caso el operador no puede responder a cambios de voltaje dentro de las discontinuidades. A este tipo de control se conoce como control de zona muerta. Si la regulación se inicia con una diferencia mínima de voltaje en la variable controlada y si la intensidad varía en proporción al cambio, se le conoce como control proporcional.

En el proceso de control el operador (regulador) tiene que vencer la rigidez del resorte ( $k$ ) aplicando una fuerza proporcional al error ( $F = K\Delta V$ ). Si el operador se reemplaza con un control automático, se deberá incluir un elemento de medición para detectar el error de voltaje  $\Delta V$ , y un regulador para producir la fuerza proporcional. Al factor  $K$  se denomina ganancia, mientras que al proceso de medición y la alimentación de señal de salida en la entrada, se le conoce como proceso de retroalimentación. La retroalimentación se caracteriza por una ganancia de retroalimentación  $K_f$ . Es claro que para incrementos pequeños de voltaje ( $\Delta V$ ), el voltaje puede ser incrementado a un nivel específico si se dispone de una ganancia grande.

Esto sin embargo incrementa las dificultades de control, ya que es difícil controlar fuerzas grandes con precisión y sin grandes oscilaciones.

### **3.2. ELEMENTOS IMPORTANTES DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN.**

El sistema de excitación de generadores síncronos está constituido por los siguientes elementos:

1) El devanado de campo, localizado en las ranuras del rotor o sobre los polos en forma de bobinas. Las conexiones de devanado de campo pasan a lo largo de la flecha y son conectados a anillos deslizantes montados en la flecha, que son alimentados con corriente directa a través del contacto con escobillas, o por un rectificador montado sobre la flecha de la máquina síncrona (en los sistemas de excitación sin escobillas).

2).- El excitador que es la fuente de corriente directa con su equipo auxiliar con rectificación o un rectificador estático. Dependiendo del tipo de excitador, el sistema de excitación puede ser clasificado como electromecánico o electrónico. Los sistemas de corriente directa pueden ser auto excitados o con excitación independiente. En los alternadores son configuración normal – campo rotatorio y armadura estática – la señal rectificada se suministra al generador síncrono a través de anillos deslizantes. En el sistema de excitación con generador invertido la armadura se encuentra en el rotor, donde también se conecta al sistema de rectificación, que gira a la misma velocidad del generador. La conexión al devanado de campo del generador síncrono se hace directamente sin necesidad de anillos deslizantes ni escobillas. En los sistemas de excitación estáticos no existen elementos rotatorios, la señal de corriente directa se obtiene por dispositivos electrónicos cuya configuración es diversa, la alimentación al devanado de campo del generador síncrono se realiza a través de anillos deslizantes y escobillas.

3) El regulador automático de voltaje (RAV) que trata de controlar la corriente de campo de la máquina síncrona, de acuerdo con los criterios especificados. Los sistemas de excitación han evolucionado en la dirección de la substitución de los elementos electromecánicos por elementos estáticos, aumentando significativamente la respuesta en el tiempo.

4) Circuitos y sistemas auxiliares para estabilización interna, limitadores de corriente de campo máxima y mínima, cambio manual operación manual, etc.

### 3.3. REQUERIMIENTOS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO.

El control automático de excitación de los generadores síncronos es un medio importante para conseguir la calidad necesaria de la energía eléctrica, la estabilidad y confiabilidad del servicio eléctrico. La solución de los problemas involucrados es compleja e impone requerimientos específicos a todos los elementos del sistema de excitación y del control del mismo. Los problemas y requerimientos más importantes son los que se enumeran a continuación:

- 1) El sistema de excitación deberá de tener alta confiabilidad de operación. Esto se considera en la selección del tipo de excitación para cada máquina específica dependiendo del diseño, capacidad, parámetros y la localización dentro del sistema de potencia. La confiabilidad la determina también la elección de variables a controlar, el lugar de la conexión de los transformadores de medición y de los componentes de los circuitos. El sistema de excitación deberá ser capaz de operar en condiciones de sobreexcitación y subexcitación, además deberá de proporcionar los medios para un control unitarios o control múltiple, para la conexión automática de un sistema de excitación de reserva y para la distribución proporcional de la potencia reactiva entre generadores.
- 2) El sistema de control automático deberá asegurar la calidad de voltaje para las condiciones en estado permanente, es decir, deberá de mantener con gran precisión el voltaje en los nodos terminales de los generadores. Este requerimiento se consigue con altas ganancias en los RAV.
- 3) El control automático de excitación deberá de asegurar la estabilidad estacionaria del sistema eléctrico ante todas las condiciones de operación, incluyendo: la desconexión de un generador síncrono en vacío y con carga; la conexión de un generador a una línea de transmisión sin carga; la operación del generador ante condiciones de sobrecarga y de subexcitación; condiciones normales de carga y condiciones de postfalla.
- 4) Los generadores con RAV conectados a las líneas de transmisión largas, deberán de suministrar una potencia de transmisión igual a la máxima capacidad de la línea bajo condiciones de voltaje constante en los nodos donde hay generadores conectados.

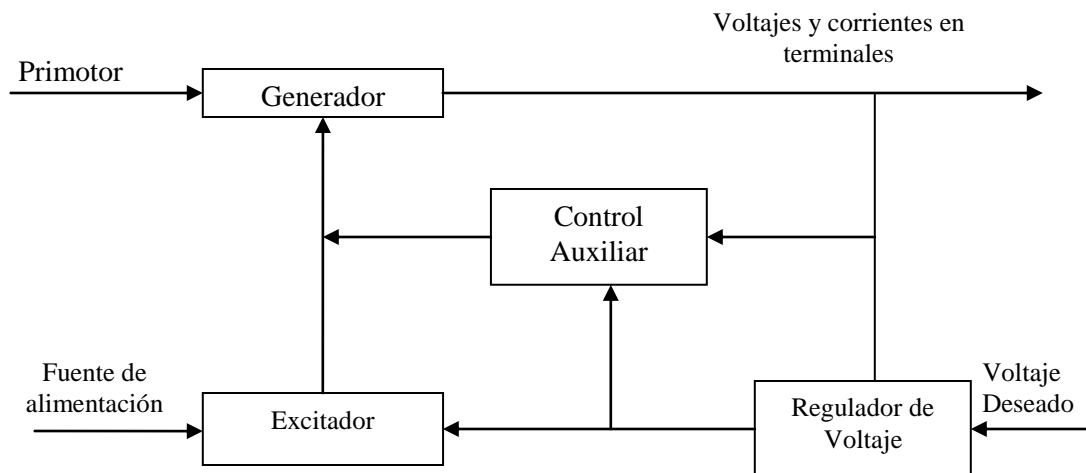
Todos estos requerimientos se satisfacen con una elección apropiada de la ley de control y del tipo de regulador, ganancias, y de los parámetros de los elementos de estabilización.

5) El sistema de excitación deberá asegurar el amortiguamiento positivo de las oscilaciones naturales forzadas, de pequeña y gran amplitud. Es decir, deberá de mejorar la calidad del proceso transitorio de los sistemas eléctricos. Un buen amortiguamiento incrementa la estabilidad resultante, elimina la posibilidad de violación de la estabilidad durante el segundo ciclo de oscilación y reduce las fluctuaciones de voltaje en los nodos ante cambios súbitos de carga.

6) El sistema de excitación debe proporcionar un límite aceptable de estabilidad transitoria. Para este propósito deberá tener una respuesta rápida y capacidad suficiente.

### 3.4. CONFIGURACIONES DE CONTROL.

Una configuración simplificada de los componentes de un sistema de excitación en forma de diagrama de bloques se muestra en la figura 3.1.



**Figura 3.1.** Componentes del Sistema de Excitación

Anteriormente, el excitador más común fue el generador de corriente continua. Sin embargo, actualmente existe gran cantidad de sistemas de estado sólido, los hay en alguna forma de rectificador con diodos o tiristores alimentados por la barra de corriente alterna o con un grupo generador – excitador de corriente alterna.

El regulador de voltaje es la inteligencia del sistema y controla la salida del excitador de tal manera que el voltaje y potencia reactiva generada cambie de la manera deseada. En los primeros sistemas el “regulador de voltaje” fue totalmente manual. El operador observaba el voltaje terminal y ajustaba el reóstato de campo para obtener las condiciones de salida deseadas.

En la actualidad los reguladores de voltaje incluyen un controlador que sensa el voltaje de salida del generador (y algunas veces la corriente) iniciando una acción correctiva en la dirección adecuada. La velocidad de este aparato es de primordial importancia en los estudios de estabilidad.

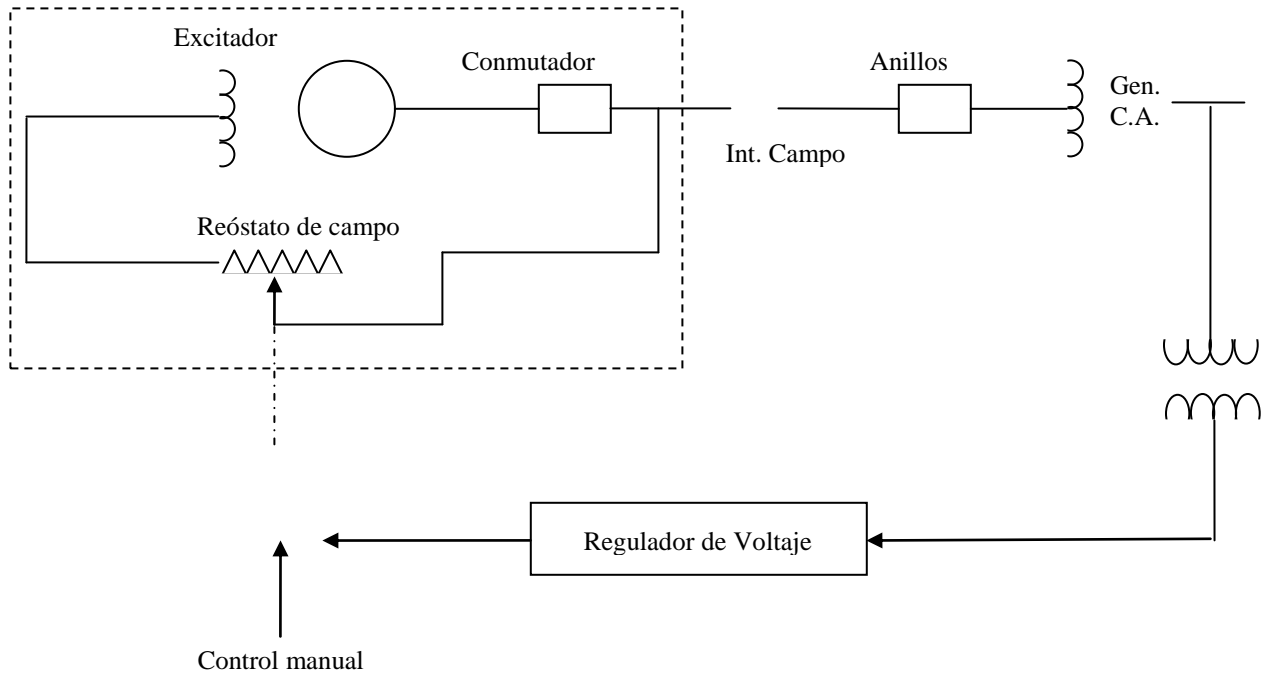
Debido a la gran inductancia del devanado de campo del generador es difícil hacer cambios rápidos en esta corriente. Esto introduce un considerable atraso en la función de control y es uno de los mayores problemas en el diseño de sistemas de regulación.

Los controles auxiliares mostrados en la figura. 3.2 pueden incluir diversas características, por ejemplo; amortiguamiento para prevenir sobrepasos; un comparador para fijar los límites de excitación, etc. Otros controles auxiliares pueden ser la retroalimentación de velocidad, frecuencia, aceleración u otras variables.

### **3.4.1. Sistemas Básicos.**

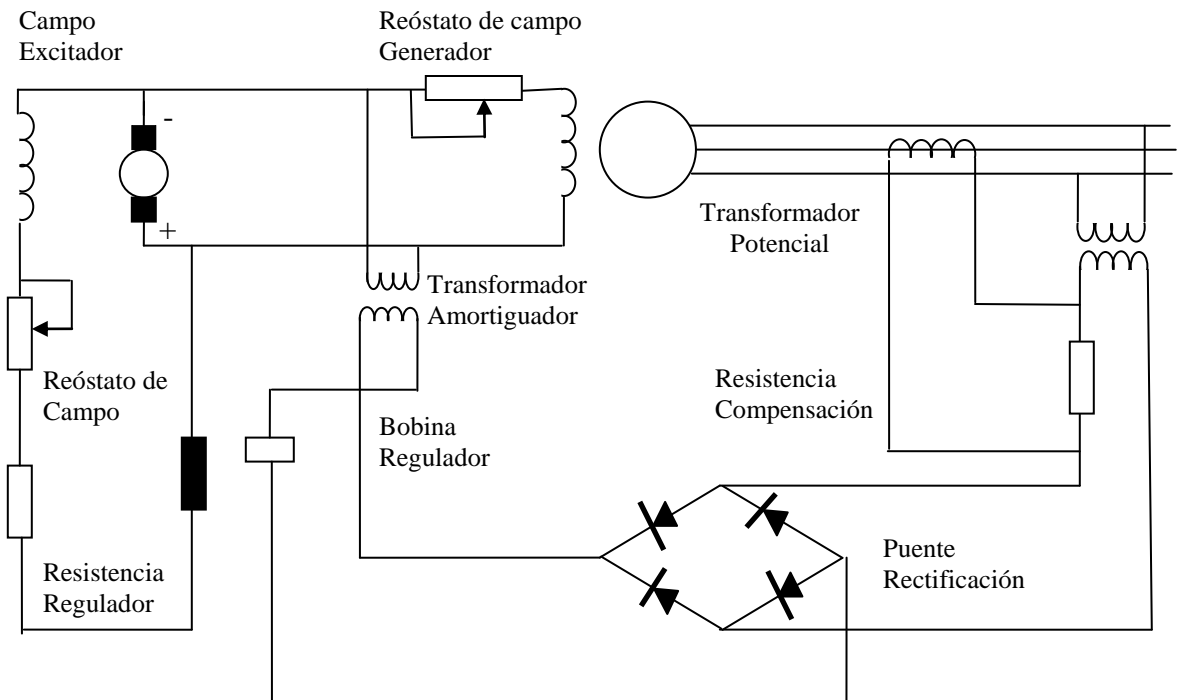
Un sistema que puede ser clasificado como de respuesta lenta, la figura. 3.2 es un arreglo compuesto de un excitador principal de corriente continua, con control de campo manual o automático. El regulador detecta el nivel de voltaje y activa un aparato mecánico para cambiar el control del reóstato de campo. Un control reostático común fue el regulador Silverstat que consiste de una bobina de regulación que opera un apuntador el cual actúa sobre una fila espaciada de botones de plata para sistemáticamente cortocircuitar secciones de reóstato. El sistema tiene la forma mostrada en la figura 3.3 Un incremento en el voltaje de salida del generador causará un incremento en el voltaje del regulador. Esto produce un incremento en la corriente a través de la bobina del regulador que opera mecánicamente un

solenóide para insertar elementos de resistencia al excitador. El resultado es una reducción del voltaje y corriente del excitador que da lugar a una disminución de campo del generador y en el voltaje terminal del mismo.



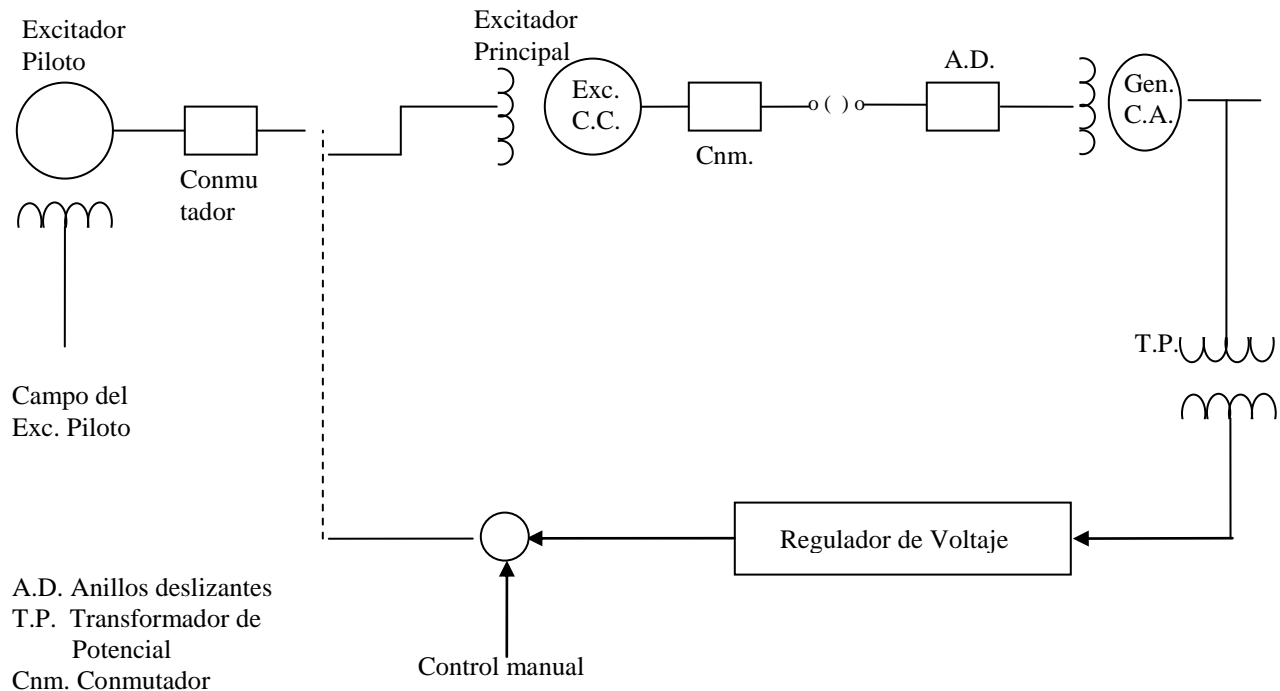
**Figura 3.2.** Excitador principal con control reostático

Dos características adicionales de este sistema de excitación son el transformador de amortiguamiento y el compensador de corriente. El primero es un amortiguador eléctrico para reducir la acción de salida excesiva del elemento móvil. El compensador de corriente es usado para controlar la distribución de potencia reactiva entre los generadores operando en paralelo. El transformador de corriente y la resistencia de compensación introducen una caída de voltaje en el circuito de potencial proporcional a la corriente de línea. La relación de fase es tal que para corrientes con factor de potencia en atrasado la caída de voltaje en la resistencia de compensación se suma al voltaje del transformador de potencial. Esto causa que el regulador disminuya el voltaje de excitación para un incremento en la corriente de atraso (incremento en la potencia reactiva de salida) y provoque una característica con pendiente negativa para asegurar que la potencia reactiva se comparta entre generadores en paralelo.



**Figura 3.3** Excitador principal autoexcitado con regulador Silverstat

El siguiente nivel de complicación en los sistemas de excitación consiste en la inclusión de un excitador principal y un excitador piloto como se ilustra en la figura 3.4. Este sistema tiene una respuesta mucho más rápida que el excitador autoexcitado ya que el control de campo del excitador es indispensable del voltaje de salida del excitador. El control es similar al descrito anteriormente, ya que el posicionador del reóstato es electromecánico y aunque la respuesta es más rápida que para el caso de excitador autoexcitado, es lento comparado con los sistemas modernos.



**Figura 3.4.** Sistema con excitador principal y excitador piloto

Los dos sistemas anteriores son ejemplos de sistemas antiguos y muestran de forma directa y sencilla los medios para influir en el control de excitación. Actualmente son considerados anticuados y no tiene posibilidad de mejoramiento en la respuesta en tiempo debido a la fricción, zonas muertas y pérdida de sensibilidad.

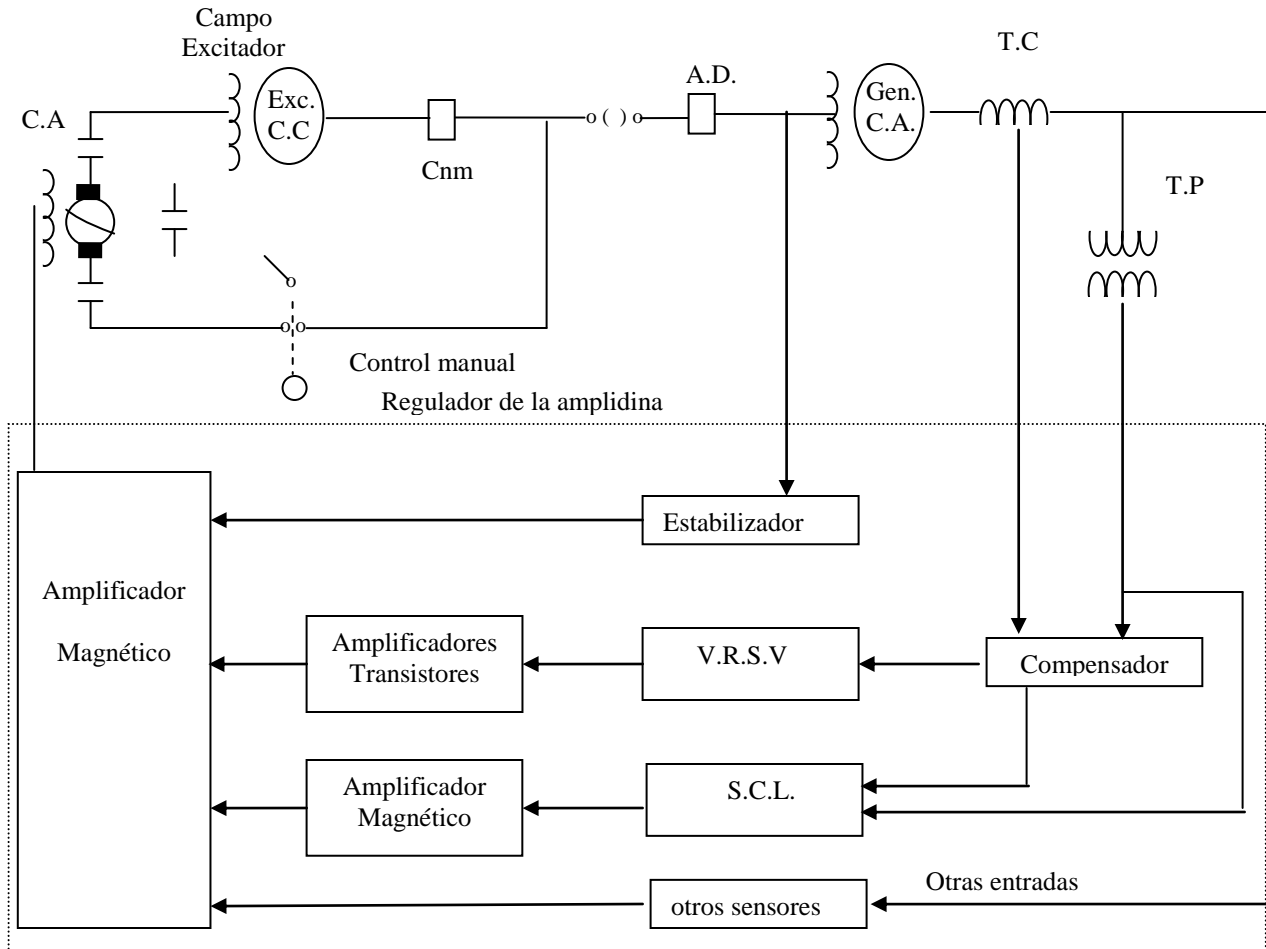
El primer paso en la sofisticación de los sistemas antiguos fue de inclusión de un amplificador de acción rápida en la trayectoria de retroalimentación para amplificar el error de voltaje e inducir cambios de excitación rápidos.

### 3.4.2. Sistemas de excitación con Excitador de Corriente Directa.

Existen dos sistemas de este tipo. Los dos tienen amplificadores en la trayectoria de retroalimentación; uno de ellos usa un amplificador rotatorio y el otro utiliza un amplificador magnético estático.



En la figura 3.5 se muestra un sistema que incorpora un amplificador rotatorio o amplidina en el circuito de excitación de campo. Este amplificador es usado para reforzar la excitación de campo en la dirección deseada y resulta mucho más rápido que los excitadores autoexcitados.



C.A. Devanado de campo de la amplidina

Cnm. Conmutador

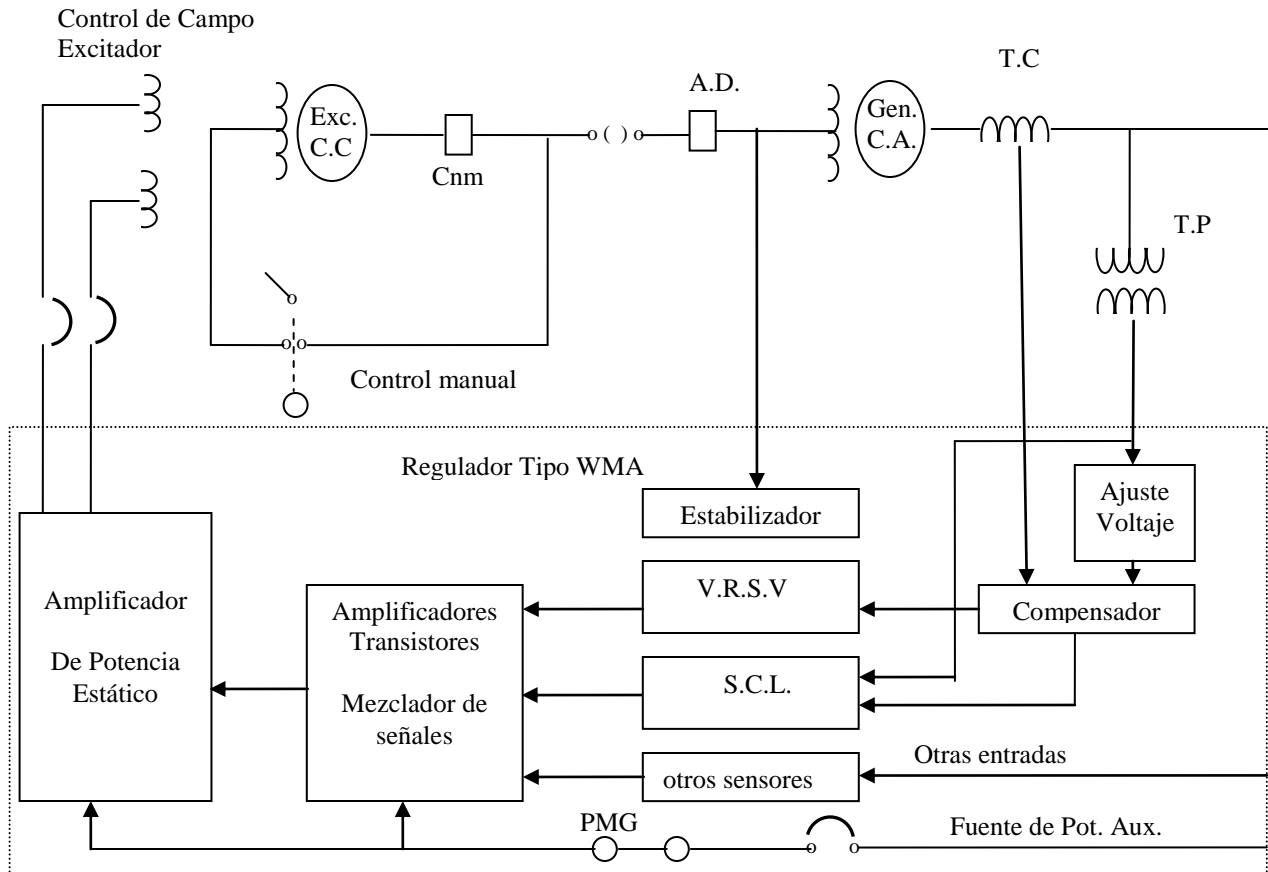
V.R.S.V. Voltaje de referencia y sensores de voltaje

S.C.L. Sensores y Límites de corriente

**Figura 3.5** Sistema de control de excitación con amplificador rotatorio

Otro sistema con un excitador similar es el mostrado en la figura 3.6, donde la amplificación se consigue con un amplificador magnético estático que es alimentado por un grupo motor-generador de C.A. con imanes permanentes. Es común que la frecuencia de esta fuente se incremente a 420 Hz. para mejorar la respuesta de amplificación. Se observa que el excitador

tiene dos controles de campo, uno para correcciones aditivas y otro para correcciones negativas. Un tercer campo es para la excitación manual cuando el amplificador está fuera de servicio.

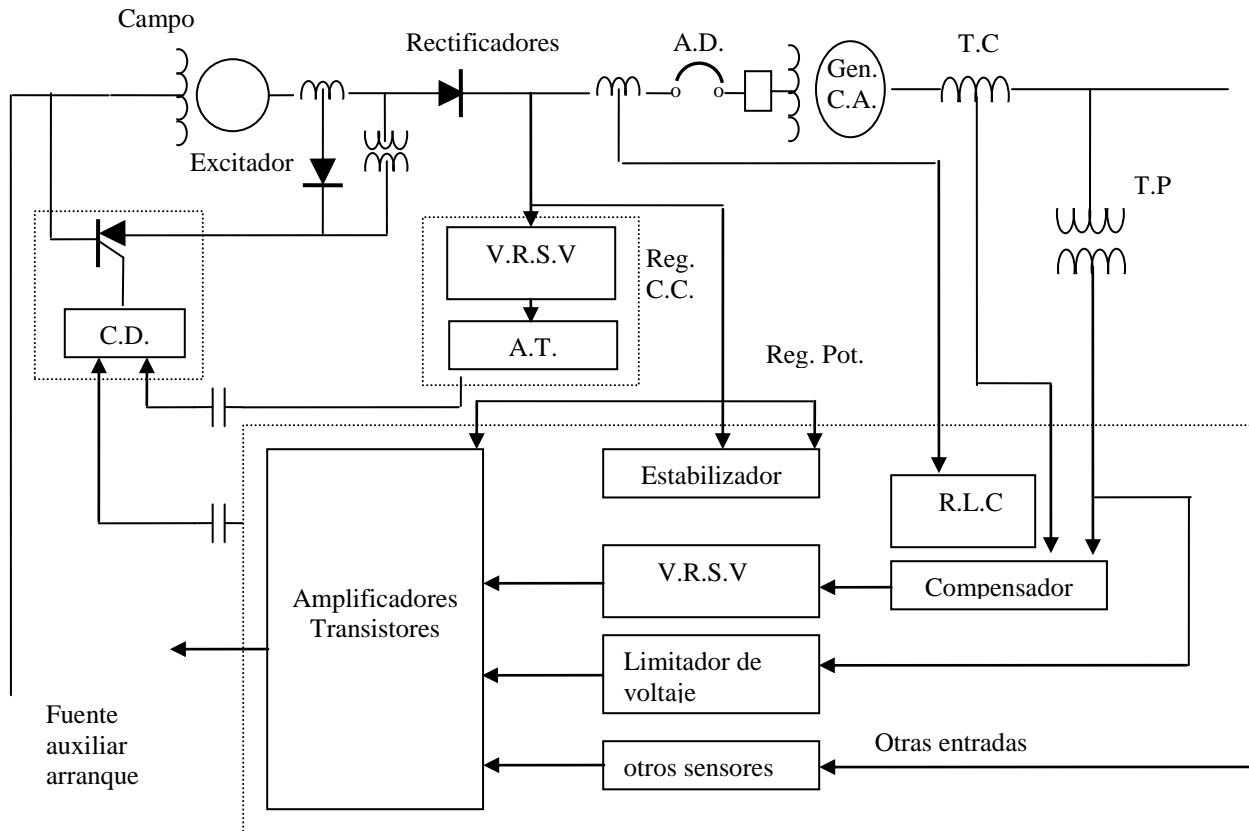


**Figura 3.6.** Sistema automático de excitación, excitador, generador de corriente continua y amplificador estático.

### 3.4.3. Sistemas de Excitación con Generador de Corriente Alterna.

Con el advenimiento de la tecnología de estado sólido y la disponibilidad de rectificadores confiables se han desarrollado otro tipo de sistemas de control. Estos sistemas utilizan un generador de corriente alterna como excitador, donde el voltaje de salida es rectificada para obtener la corriente directa requerida por el devanado del campo del generador síncrono. Los circuitos de control para estas unidades es también de estado sólido y la respuesta en general es rápida.

Un ejemplo de un alternador – rectificador se muestra en la figura 3.7. En este sistema la salida del alternador rectifica por medio de un puente de diodos y se conecta al campo del generador síncrono por medio de anillos deslizantes. El alternador–excitador es autoexcitado y controlado electrónicamente ajustando el ángulo de disparo de los tiristores.

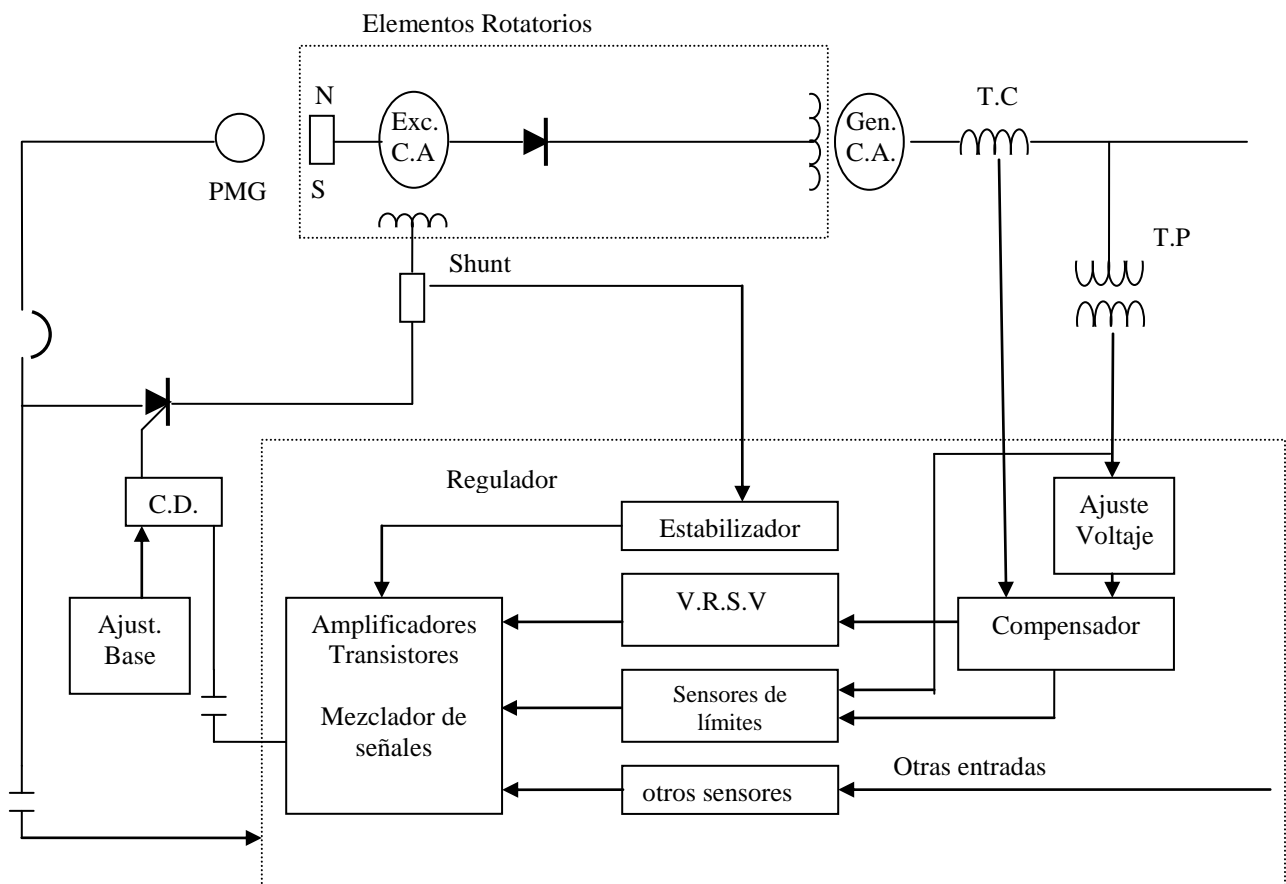


- C.D. Circuito de disparo
- V.R.S.V. Voltaje de referencia y Sensores de Voltaje
- Reg. C.C. Regulador de C.C.
- A.T. Amplificador de transistores
- R.L.C. Rectificación y limitadores de corriente

**Figura 3.7** Sistemas de excitación, excitador alternador con rectificación estacionaria no controlada (diodos).

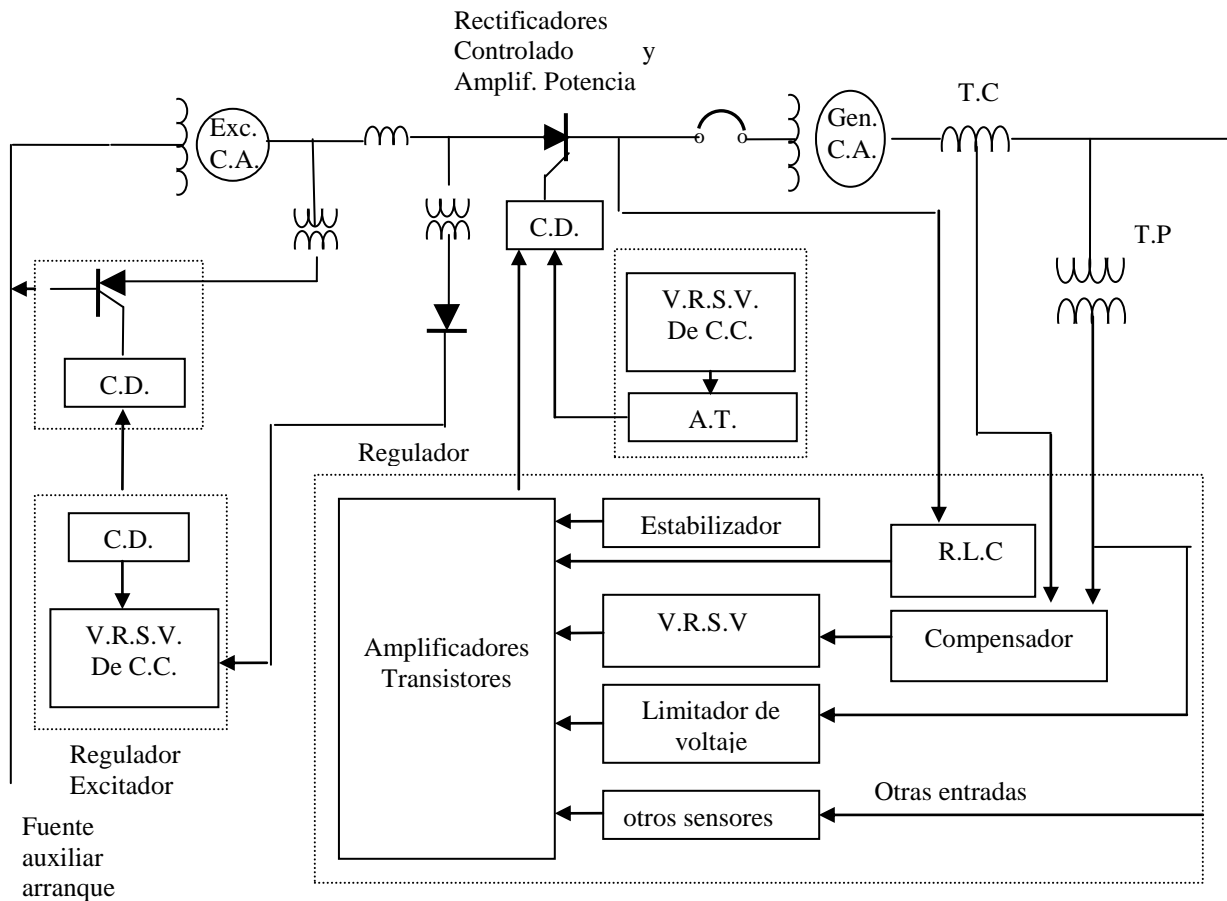
Este medio de control es muy rápido ya que el ángulo de disparo del puente de tiristores puede ser ajustado más rápidamente que las otras constantes de tiempo involucradas. El alternador – excitador aunque tiene la configuración normal tiene un diseño especial con la finalidad de mejorar la respuesta de tiempo.

Otro ejemplo de alternador – rectificador se muestra en la figura 3.8. Este sistema no tiene escobillas, es decir, no requiere de anillos deslizantes ya que el alternador–excitador y los diodos rectificadores giran en la misma flecha. Este sistema incorpora un generador piloto, de imanes permanentes (PMG), con un campo magnético permanente para alimentar el campo (en el estator) del alternador – excitador. De esta forma todo el acoplamiento entre las componentes estáticas y rotatorias es electromagnético. Sin embargo, no es posible medir las variables de campo del generador directamente, ya que estas componentes están en movimiento con el rotor y no pueden usarse anillos deslizantes.



**Figura 3.8.** Sistema alternador excitador con rectificadores rotatorios sin escobillas

La respuesta de este sistema es mejorada diseñando el alternador – rectificador para operar a frecuencias mayores que la del generador principal. Se usan alternadores a frecuencias de 300 y 420 Hz. Y se reportan excelentes características de respuesta.



**Figura 3.9.** Sistema de excitación alternador-rectificación tiristores

Otro desarrollo importante en los sistemas de excitación ha sido el diseño de sistemas de excitación basados en el esquema alternador – tiristores. En la figura 3.9 se muestra este sistema. La excitación del generador síncrono se alimenta directamente, sin anillos deslizantes ni escobillas, por un sistema de tiristores con un alternador-excitador como fuente. En este caso sólo es necesario ajustar el ángulo de disparo de los tiristores para cambiar el nivel de excitación, lo que prácticamente se realiza sin retardos en tiempo. Para esto se requiere de un alternador-excitador de gran capacidad y por otro lado es necesario que tenga una capacidad de operación continua a su voltaje de techo. En sistemas lentos, el voltaje de techo se alcanza después de un retardo de tiempo y no es deseable una operación sostenida a estos niveles.

---

#### **3.4.4. Sistemas de Excitación Estáticos.**

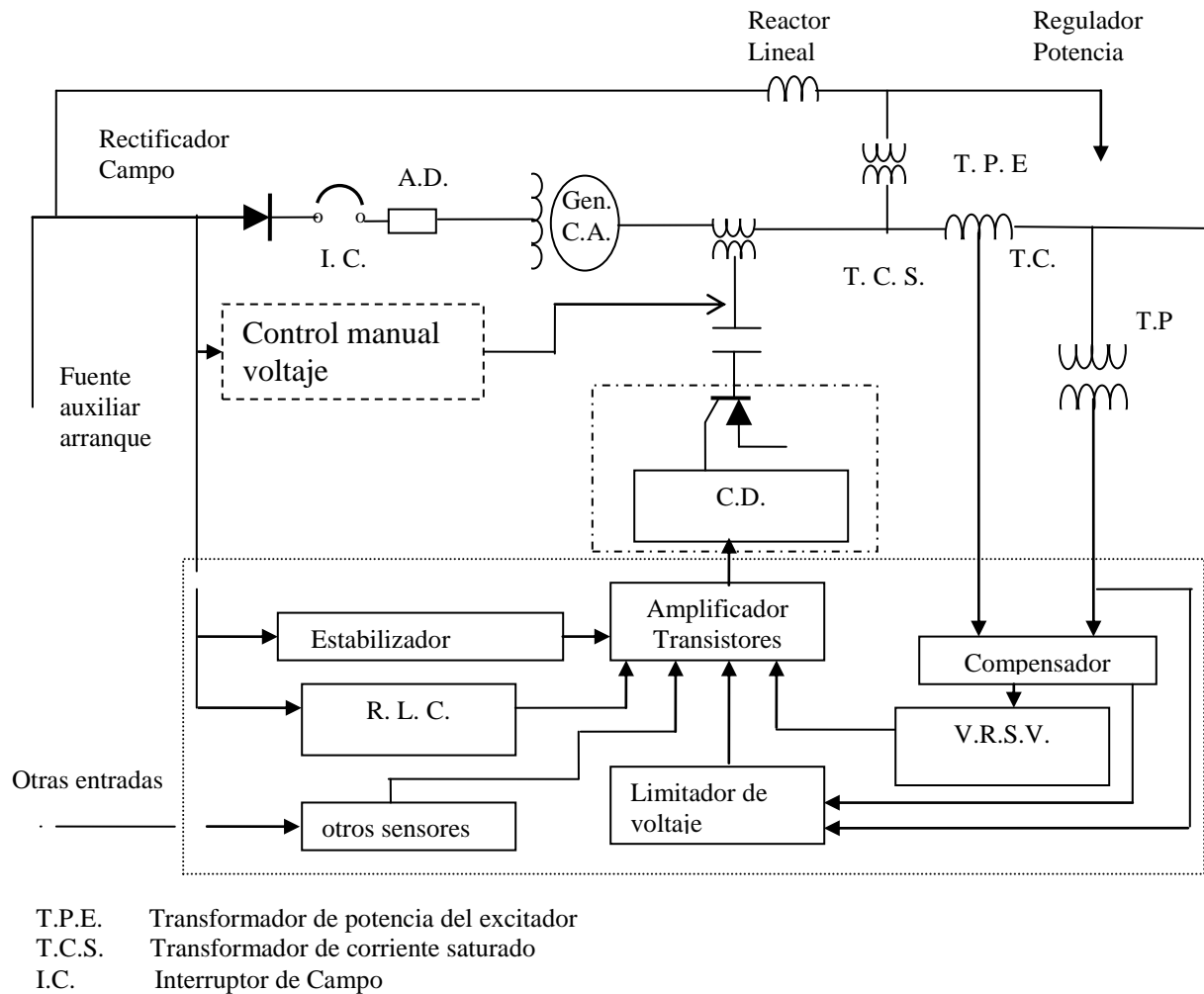
Los sistemas de excitación estáticos no contienen elementos rotatorios, lo que los hace sumamente rápidos. Los primeros sistemas estáticos emplearon válvulas rectificadoras de arco de mercurio, actualmente se utilizan elementos de estado sólido que pueden ser diodos o tiristores de potencia dispuestos en arreglos en paralelo para conseguir la capacidad requerida para excitar al generador.

Primero se describirán sistemas que utilizan diodos como elementos de rectificación. Estos sistemas se conocen como de rectificación compensada. En la figura. 3.10 se muestra el diagrama esquemático de este tipo de sistema de excitación.

Este sistema puede ser visto como una forma de autoexcitación del generador principal. La entrada al excitador llega de las terminales del generador, no de la flecha como en los sistemas descritos anteriormente. La retroalimentación eléctrica es controlada por reactores saturables, el control está diseñado para emplear las variables de salida del generador y las del excitador, además son fuentes inteligentes. El sistema es totalmente estático. Aunque originalmente fue diseñado para usarse en generadores de poca capacidad, este mismo principio puede ser aplicado a generadores grandes.

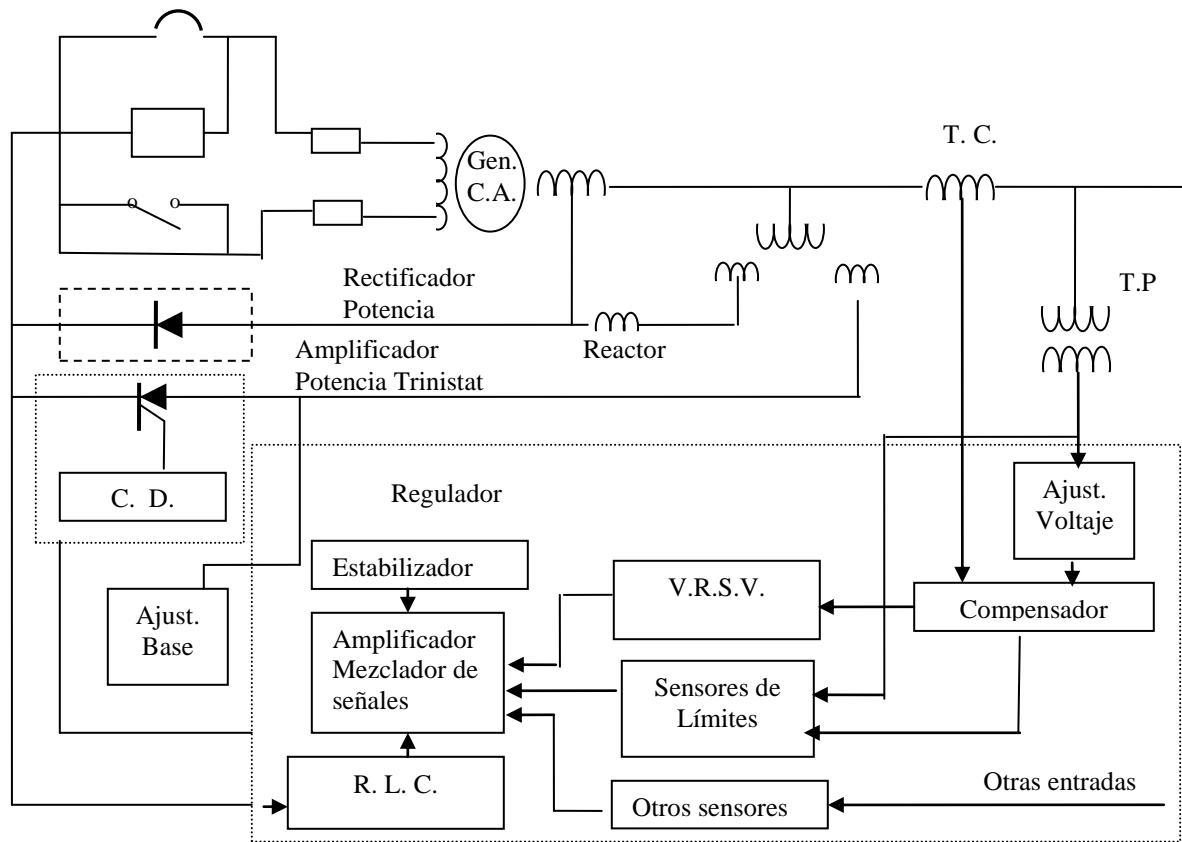
Los generadores autoexcitados poseen una desventaja inherente que consiste en que cuando el voltaje de salida (de C.A.) es bajo, el excitador es forzado a corregir el bajo voltaje y el del generador. Esto puede ser parcialmente compensado usando la corriente y voltaje de salida en el esquema de control de voltaje de manera que durante fallas sea lo suficientemente rígida para los efectos del control.

Una variación del esquema consiste en añadir una segunda salida rectificadora a la retroalimentación de la autoexcitación para conseguir un control adicional de excitación. Este esquema se muestra en la figura 3.11. El esquema básico de autoexcitación del generador principal es el mismo. Aquí, sin embargo, el regulador de voltaje controla un segundo sistema de rectificación, llamado amplificador de potencia Trinistat, para alcanzar el control de excitación deseado. Este sistema es totalmente estático y es inherentemente muy rápido, las únicas constantes de tiempo son las del reactor y la del regulador.



**Figura 3.10.** Sistema de excitación estático con rectificación-compuesta

La última categoría de los sistemas de excitación es el generador síncrono autoexcitado, donde la rectificación se realiza con la ayuda de tiristores en lugar de diodos. Este sistema se muestra en la fig. 3.12. Los circuitos de los reguladores estáticos de voltaje usan, voltaje, corriente del estator y variables de excitación para generar señales de control por medio de los cuales son controlados los tiristores. Este tipo de control es muy rápido ya que no tiene tiempos de retardo en el disparo del ángulo de los tiristores.

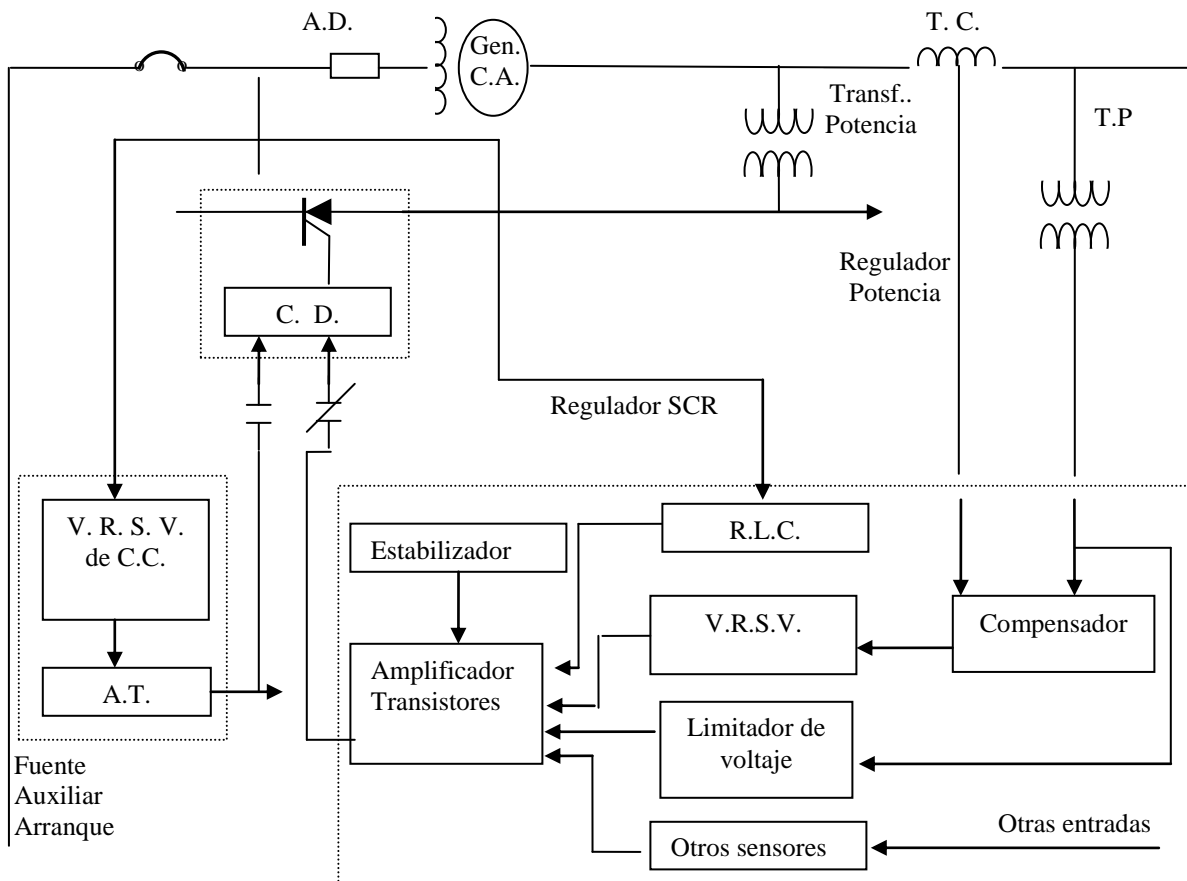


**Figura 3.11** Sistema de excitación de rectificación compuesta y fuente de potencial rectificada.

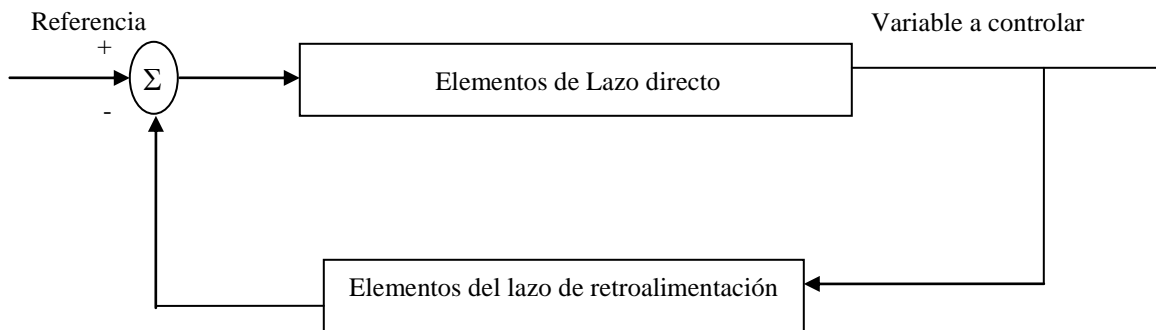
### 3.5 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS IMPORTANTES DE SISTEMAS DE EXCITACIÓN

Los sistemas de control de excitación pueden ser representados en su forma más general por el diagrama en bloques mostrado en la figura 3.13, consiste de un elemento de lazo directo, un elemento de retroalimentación y de un elemento comparador. Cada lazo puede estar constituido por un grupo de bloques de configuración diversa.





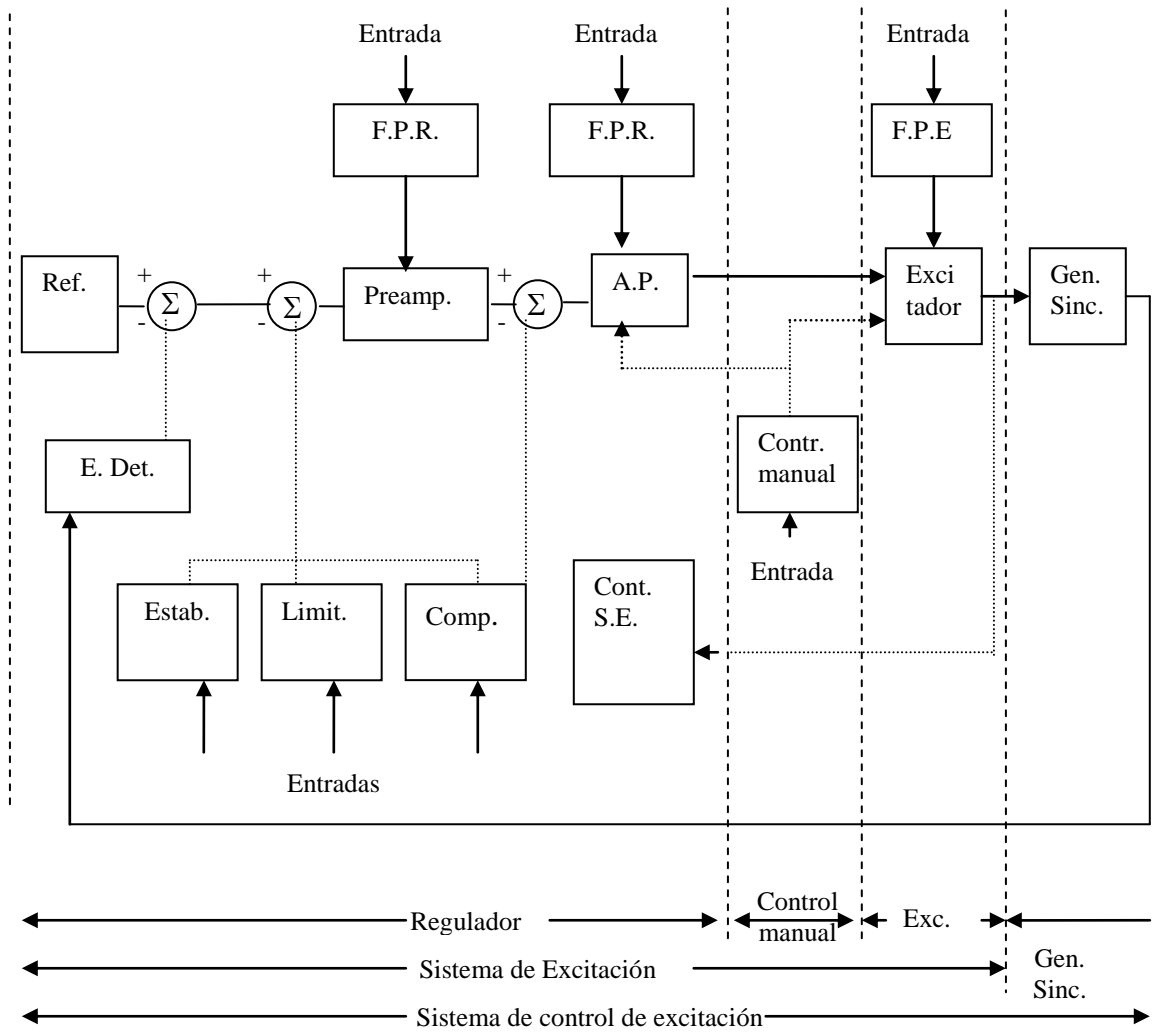
**Figura 3.12** Sistema de excitación estático con rectificación (tiristores) de fuente de potencial rectificada.



**Figura 3.13** Sistema de control simplificado

Una representación en bloques más detallada se muestra en la figura 3.12. Se observa que la máquina síncrona es considerada como una parte del sistema de control de excitación y los

elementos de control son denominados simplemente como sistema de excitación. A cada tipo de bloque le corresponde un tipo de función de transferencia.



- F.P.R. Fuente de potencial del regulador.
- F.P.E. Fuente de potencia del sistema de excitación.
- Gen. Sinc. Generador Síncrono.
- E.Det. Elemento de detección.
- Preamp. Preamplificación.
- Estab. Sistema de Estabilización.
- Limit. Limitador.
- A.P. Amplificador de Potencia.
- Cont. S.E. Control del Sistema de Estabilización de potencia.
- Comp. Comparador.

**Figura. 3.14** Sistema de excitación automático completo

---

### 3.6. MODELADO DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN.

El voltaje de salida del excitador es una función del voltaje del regulador y se expresa por la ecuación

$$T_E E_{FD} + R_{if} = E_{FD} - V_R$$

De donde:

$$I_f = G E_{FD} + G E_{FD} S_E$$

Usando el operador  $s = \frac{d}{dt}$  y reduciendo, se obtiene:

$$E_{FD} = \frac{V_R - E_{FD} S_E}{K_E + s T_E}$$

Donde:

$$K_E = R G - 1$$

Podemos considerar que el generador responde como un amplificador lineal con una constante de tiempo  $T'_{do}$  cuando opera sin carga y con una constante  $T'_d$  cuando está en corto circuito. Cuando opera con carga tendrá una constante de tiempo entre los dos extremos señalados y se le representará con la siguiente ecuación.

$$V_t = \frac{KG}{1 + s TG} E_{FD}$$

Si el generador opera en el rango no lineal se deberá de representar la saturación.

### 3.7. MODELOS NORMALIZADOS DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN.

Los modelos tienen diferente grado de complejidad dependiendo de los datos disponibles o de la importancia del sistema de excitación dentro del sistema eléctrico. Cualquier modelo ya sea lineal o no lineal, incluyendo el número y tipo de no linealidades, puede ser formulado.

Los modelos normalizados están descritos en p.u. donde 1.0 p.u de voltaje terminal del generador es igual al voltaje nominal del mismo y 1.0 p.u. del voltaje del excitador es el valor requerido para producir el voltaje nominal del generador en el entrehierro. Esto significa que en operación sin carga y despreciando la saturación  $E_{FD} = 1.0$  p.u dá exactamente  $V_t = 1.0$  p.u.

En la siguiente tabla 3.1, se proporciona una lista de símbolos usados en los cuatro tipos de modelos normalizados por el IEEE.

**Tabla 3.1.** Terminología de los Sistemas de Excitación

Símbolo	Descripción
$E_{fd}$	Voltaje de salida del excitador
$I_F$	Corriente de campo del generador
$V_t$	Voltaje terminal del generador
$I_t$	Corriente terminal del generador
$K_A$	Ganancia del regulador
$K_E$	Constante del excitador (campo autoexcitado)
$K_F$	Ganancia del circuito estabilizador del regulador
$K_I$	Ganancia del circuito de corriente (sistema tipo 3)
$K_P$	Ganancia del circuito de potencia (sistema 1S y 3)
$K_V$	Constante de crecimiento /disminución rápida de voltaje (sistema tipo 4)
$S_E$	Función de saturación del excitador
$V_S$	Entrada de señal auxiliar (sistema de estabilización)
$T_A$	Constante de tiempo del regulador – amplificador
$T_E$	Constante de tiempo del excitador

$T_F$	Constante de tiempo del circuito estabilizador
$T_{F1}, T_{F2}$	Similar a $T_F$ para sistemas de rectificación rotatorio
$T_R$	Constante de tiempo del filtro del regulador de entrada
$T_{RM}$	Constante de tiempo del reóstato
$V_R$	Voltaje de salida del regulador
$V_{Rmax}$	Valor máximo de $V_R$
$V_{Rmin}$	Valor mínimo de $V_R$
$V_{REF}$	Voltaje de referencia del regulador
$V_{RH}$	Voltaje de referencia del reóstato de campo

### 3.8. TIPOS DE SISTEMAS DE EXCITACIÓN.

Básicamente podemos considerar tres distintos tipos de Sistemas de excitación:

#### 3.8.1. Sistema de Excitación con excitador de corriente directa (Tipo DC).

El cual utiliza un generador de corriente directa con un conmutador como la fuente de potencia del sistema de excitación.

Podemos mencionar los siguientes tipos:

- a) Tipo DC1A. Excitador con conmutador CD
- b) Tipo DC2A. Excitador con conmutador CD con regulación
- c) Tipo DC3A. Excitador con conmutador CD con regulador de actuación discontinua.

#### 3.8.2. Sistema de excitación con generador de corriente alterna. (Tipo AC).

El cual usa un alternador y rectificadores rotatorios o estacionarios para producir la corriente directa necesaria por el campo de la máquina síncrona.

Podemos mencionar los siguientes:

- a) Tipo AC1A. Sistema de excitación Alternador- Rectificador con rectificador no controlado y retroalimentación de la corriente de campo del excitador.
- b) Tipo AC2A. Sistema de excitación Alternador – Rectificador de alta respuesta inicial con rectificador no controlado y retroalimentación desde la corriente de campo del

excitador. Es similar al tipo AC1A excepto por la inclusión de la compensación de constante de tiempo del excitador y el elemento limitante de la corriente de campo del excitador

c) Tipo AC3A. Excitador rectificador-Excitador con limitador de corriente de campo del alternador.

d) Tipo AC4A. Excitador con Alternador – rectificador controlado.

e) Tipo AC5A. Sistema de excitación con rectificador rotatorio simplificado.

f) Tipo AC6A. Sistema de excitación alternador – rectificador con rectificador no controlado y sistema de suministro de regulador de voltaje electrónico.

### **3.8.3. Sistemas de excitación estático. (Tipo ST)**

En el cual la potencia de excitación es suministrada a través de transformadores o devanados auxiliares del generador y rectificadores.

a) Tipo ST1A. Excitador con fuente de potencial controlada.

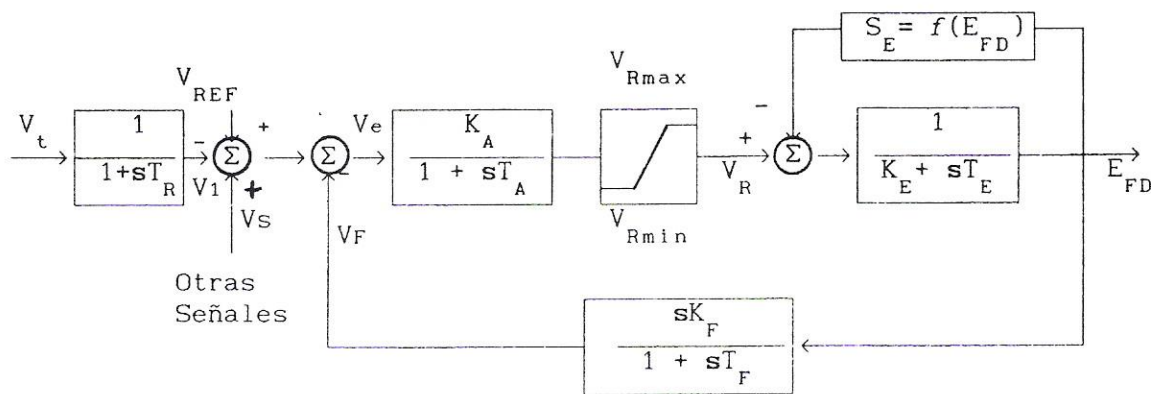
b) Tipo ST2A. Excitador con fuente de alimentación compuesta (de voltaje y corriente).

c) Tipo ST3A. Excitador estático con fuente compuesta y rectificación controlada.

Únicamente describiremos los modelos de sistemas de excitación más comunes del tipo 1, considerando que este es el tipo de modelo que se empleó para el análisis del Sistema eléctrico de potencia.

### 3.9. SISTEMA TIPO 1. REGULADOR Y EXCITADOR DE OPERACIÓN CONTÍNUA.

El diagrama de bloques de este tipo se muestra en la figura 3.15. En este modelo se incluyen los efectos de filtrado del voltaje terminal  $V_t$ , con una constante de tiempo  $T_R$ . Generalmente es muy pequeña por lo que se puede despreciar. Este modelo se usa para representar una gran variedad de sistemas de excitación.



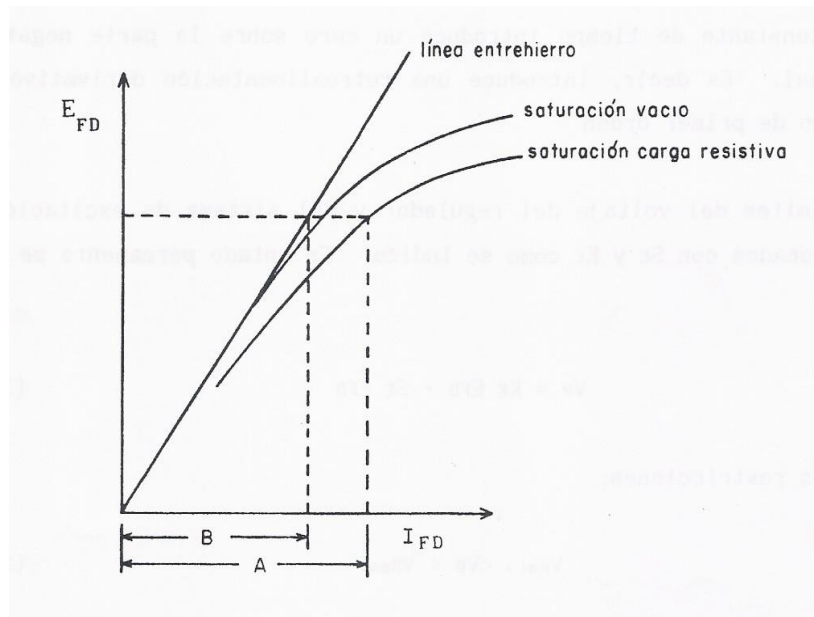
**Figura 3.15** Sistema de excitación tipo 1 para reguladores y excitadores de acción continua

El amplificador consta de la constante de tiempo  $T_A$ , la ganancia  $K_A$  y los límites de salida  $V_{Rmax}$   $V_{Rmin}$ . Cuando no se consideran los efectos del filtrado del voltaje y del lazo interno de estabilización ( $K_F = 0$ ), la entrada del amplificador es el error de voltaje ( $V_e = V_{REF} - V_t + V_s$ ). Este voltaje es pequeño, pero de valor finito en estado permanente. El excitador se representa por un sistema lineal de primer orden con una constante de tiempo  $T_E$ . Además pueden ser incluidos los efectos de saturación por medio de la función de saturación  $S_E$ . La función de saturación se define como se muestra en la figura 3.16 por la relación:

$$S_E = (A - B) / B$$

Esta expresión tiene una dependencia no lineal de  $E_{FD}$ . Esto altera el voltaje del amplificador  $V_R$  por una cantidad  $S_E E_{FD}$  resulta un valor de voltaje efectivo  $\underline{V}_R$

$$\underline{V}_R = V_R - S_E E_{FD}$$



**Figura 3.16** Curvas de saturación de excitadores

El voltaje  $V_R$  se aplica a la función de transferencia del excitador.

Para valores pequeños de  $E_{FD}$  el sistema es lineal ( $S_E = 0$ ).

Una aproximación común de la función de saturación es por medio de una función exponencial de la forma:

$$S_E = f(E_{FD}) = A_{EX} \exp(B_{EX} E_{FD})$$

Los coeficientes de saturación  $A_{EX}$ ,  $B_{EX}$  se calculan de los datos de saturación, los valores de  $S_E$  y  $E_{FD}$  se conocen para dos puntos especificados, usualmente el voltaje de techo y el 75 % del mismo.

La función de transferencia del lazo de retroalimentación contiene la constante de tiempo  $T_F$  y la ganancia del circuito estabilizador  $K_F$ . Esta constante de tiempo introduce un cero sobre la parte negativa del eje real. Es decir, introduce una retroalimentación derivativa con un retraso de primer orden.

Los límites del voltaje del regulador y del sistema de excitación están relacionados con  $S_E$  y  $K_E$  como se indica. En estado permanente se tiene:

$$V_R = K_E E_{FD} + S_E E_{FD}$$



Con las restricciones:

$$V_{Rmin} < V_R < V_{Rmax}$$

$$V_{Rmax} = (K_e + S_E E_{FDmax}) E_{FDmax}$$

La relación entre los límites inferiores es similar.

La representación en variables de estado es la siguiente:

$$V_1 = \frac{1}{T_R} (-V_1 + V_t)$$

$$V_F = \frac{1}{T_F} (-V_F + K_F E_{FD})$$

$$V_R = \frac{1}{T_A} (-V_R + K_A V_e)$$

$$V_{Rmin} < V_R < V_{Rmax}$$

$$E_{FD} = \frac{1}{T_E} [- (S_E + K_E) E_{FD} + V_R]$$

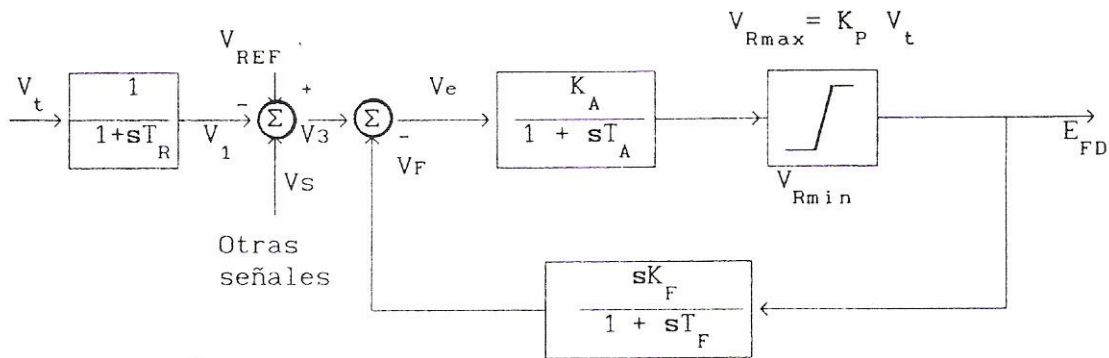
$$V_e = V_{REF} + V_S - V_1 - V_F$$

### 3.10. SISTEMA TIPO 1s. SISTEMA CON RECTIFICACIÓN CONTROLADA Y FUENTE POTENCIAL.

Este es un caso especial del sistema descrito anteriormente, donde la excitación se obtiene a través del voltaje terminal rectificado. Sistemas de este tipo se muestra en la figura. 3.13. En este caso el voltaje máximo del regulador no tiene un valor constante. EL valor límite es proporcional al voltaje terminal, es decir:

$$V_{Rmax} = K_P V_t$$

Estos sistemas tiene una respuesta casi instantánea en las componentes del excitador principal,  $K_E = 1$ ,  $T_E = 0$ ,  $S_E = 0$ . Haciendo los cambios indicados en la figura 3.15 se obtiene la siguiente figura 3.17.



**Figura 3.17** Sistema de excitación tipo IS

La representación en variables de estado para este tipo de sistema de excitación puede ser obtenida a partir de las ecuaciones escritas para el tipo 1, haciendo  $V_R = E_{FD}$  y eliminando  $V_R$  en la ecuación anterior.

$$V_1 = \frac{1}{T_R} (-V_1 + V_t)$$

$$V_F = \frac{1}{T_F} (-V_F + K_F E_{FD})$$

$$E_{FD} = \frac{1}{T_A} (-E_{FD} + K_A V_e)$$

$$V_{Rmin} < V_R < V_{Rmax}$$

$$V_e = V_{REF} + V_S - V_1 - V_F$$