

## SISTEMAS DE EXCITACIÓN

### INTRODUCCIÓN

El sistema de excitación entendido como la fuente de corriente de campo para la excitación principal de una máquina, incluyendo los medios de control es el punto inicial de este capítulo. El sistema de excitación incluye, entonces, todos los equipos requeridos para suministrar la corriente de campo a la excitación principal de la máquina eléctrica, así como cualquier equipo que permita la regulación y el control de la corriente de campo entregada.

Dada la existencia de plantas relativamente antiguas en operación en el medio, se revisan los esquemas tradicionales de excitación con base en máquinas rotativas acopladas al eje principal de la máquina. Se considera el arreglo consistente en excitatriz principal y auxiliar.

Posteriormente, se estudian los sistemas de excitación actuales, que incluyen transformador de excitación, y rectificación de onda completa por medio de tiristores. Se presenta la filosofía de diseño de estos sistemas teniendo en cuenta que si es posible controlar el voltaje del generador en forma proporcional al error instantáneo de la velocidad, pueden obtenerse torques amortiguadores considerables que mejoran la estabilidad dinámica y transiente del generador, incluyendo la estabilidad de estado estable.

Se analizan los sistemas de regulación automáticos, incluyendo sus equipos de protección y control.

Finalmente, se presentan los criterios de diseño del sistema de excitación con fundamento en normas técnicas y requerimientos propios de los sistemas de potencia actuales.

### SISTEMAS DE BARRAJE COMÚN DE EXCITACIÓN

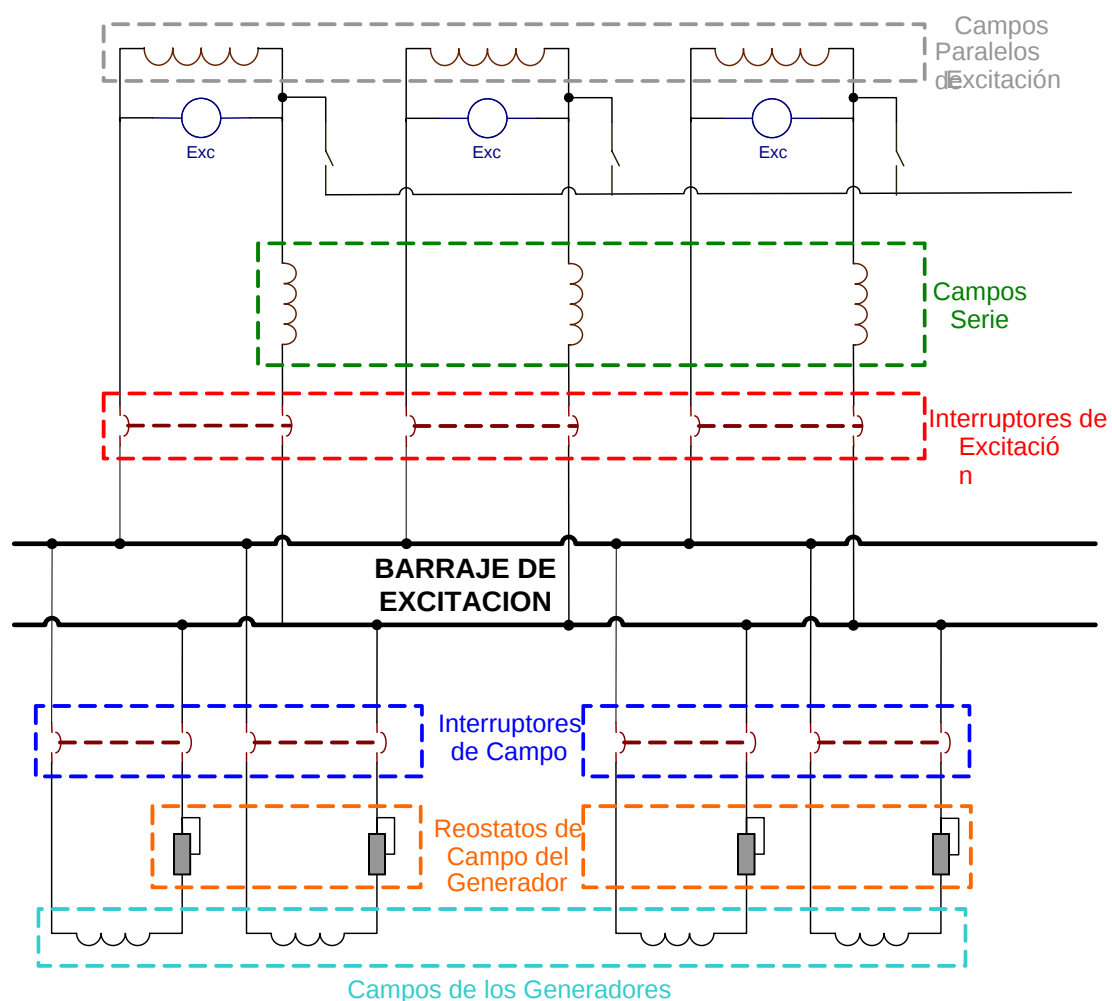
Los barrajes comunes, generalmente estaban energizados por varios excitadores accionados por motores, turbinas, máquinas de vapor, volantes hidráulicas, o combinación de las anteriores, para constituir la alimentación principal o de emergencia del campo. Normalmente, se poseía una batería en flotación sobre la barra de excitación a manera de stand-by. Batería que debería tener una capacidad suficiente para cumplir los requerimientos de excitación como mínimo durante una hora; para este caso, no se tenía la excitatriz directamente acoplada al eje del generador. Posteriormente, apareció el sistema acoplado al eje y ganó



gran aceptación, pues resolvió muchos problemas que se presentaban en el esquema anterior.

Todavía no se utilizaban las excitatrices pilotos. Los excitadores fueron invariablemente autoexcitados. En un sistema de barraje común sin batería de flotación, el barraje operaba a voltaje constante suministrado por el generador compound de corriente directa. Por lo tanto se obtenía un voltaje prácticamente constante sobre el barraje y el control de los campos individuales de los generadores se lograba a través del uso de un reóstato variable en cada campo como se muestra en la figura 1.

**Figura 1. Sistema de barraje común de excitación**



## DEFINICIONES

**Sistema de excitación.** Fuente de corriente de campo para la excitación de una máquina, incluyendo los medios de control.

**Voltaje ceiling o de techo.** Máximo voltaje que puede suministrar un excitador a determinadas condiciones de carga. Para excitatrices rotativas el voltaje de techo se especificará a velocidad nominal y a una temperatura de campo determinada.

**Tabla 1. Sistemas de excitación voltaje de techo**

| MVA   | $I_{exc}$ | Voltaje | $V_{ceiling}$ | $V_{ceiling} / V_{nominal}$ |
|-------|-----------|---------|---------------|-----------------------------|
| 27.4  | 640       | 170     | 370           | 2.18                        |
| 278   | 1100      | 325     | 760           | 2.34                        |
| 805   | 3200      | 482     | 2000          | 4.15                        |
| 670   | 5364      | 550     | 895           | 1.63                        |
| 800   | 5094      | 530     | 935           | 1.76                        |
| 242   | 3824      | 340     | 440           | 1.29                        |
| 427.8 | 3333      | 450     | 953           | 2.12                        |
| 195   | 2800      | 375     | 550           | 1.47                        |
| 171   | 1857      | 280     | 450           | 1.61                        |
| 97.5  | 720       | 375     | 375           | 1.00                        |
| 100   | 1600      | 315     | 1000          | 3.17                        |
| 279   | 1415      | 325     | 490           | 1.51                        |
| 171   | 1857      | 280     | 450           | 1.61                        |
| 556   | 4875      | 400     | 1067          | 2.67                        |
| 6.8   | 327       | 110     | 145           | 1.32                        |
| 655   | 5364      | 550     | 700           | 1.27                        |
| 495   | 5000      | 400     | 500           | 1.25                        |
| 117.2 | 1590      | 310     | 450           | 1.45                        |
| 270   | 3000      | 350     | 812           | 2.32                        |
| 250   | 2232      | 300     | 430           | 1.43                        |
| 189   | 1892      | 370     | 740           | 2.00                        |
| 400   | 1560      | 450     | 688           | 1.53                        |
| 412   | 4767      | 430     | 820           | 1.91                        |
| 332   | 3265      | 490     | 1215          | 2.48                        |

En la tabla 1 se agrupan varios datos de voltajes de techo para generadores de varias capacidades, la corriente de excitación, el voltaje de excitación nominal y la





relación entre el voltaje de techo y el voltaje nominal de excitación. Esta relación no es constante y se encuentran una gran variedad de valores.

**Voltaje nominal de techo.** Voltaje de techo de un excitador cargado con una resistencia que tiene un valor óhmico igual a la resistencia de los arrollamientos de campo a ser excitado. Resistencia que será determinada a una temperatura de:

1. 75° C para bobinados que operan con aumento de temperatura de 60° C o menos.
2. 100° C para aumentos de temperatura mayores de 60° C.

**Voltaje de campo a carga nominal.** Es el voltaje requerido a través de las terminales de campo, cuando la máquina está bajo condiciones nominales, con el campo a:

1. 75° C para aumentos de temperatura de 60° C o menos.
2. 100° C para aumentos de temperatura mayores de 60° C.

### **EXCITATRIZ PRINCIPAL**

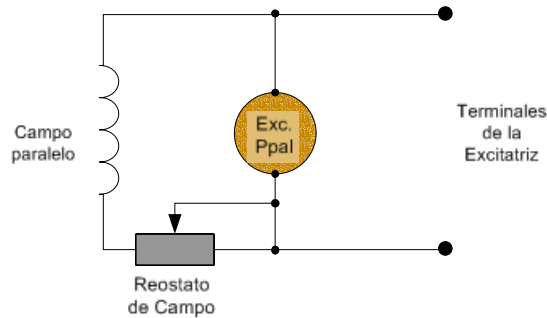
Se hace referencia a la fuente que suministra la corriente de campo a la máquina principal. Cualquier máquina de corriente directa que se utilice con este fin puede denominarse excitatriz principal. En general se clasifican de acuerdo al método como se excitan:

1. Auto excitado.
2. Excitación independiente.

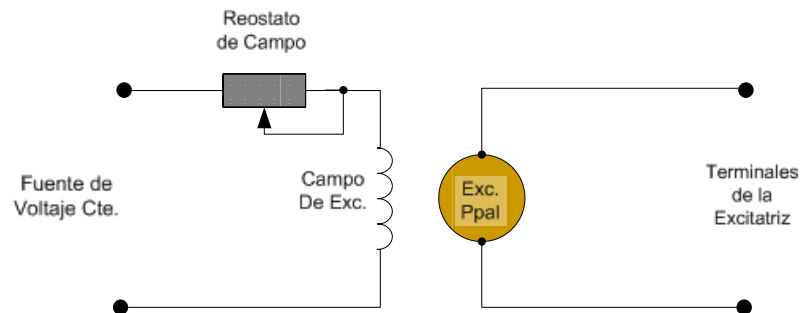


En las figuras 2 y 3 que se muestran a continuación pueden observarse:

**Figura 22. Excitatriz tipo shunt auto excitado**

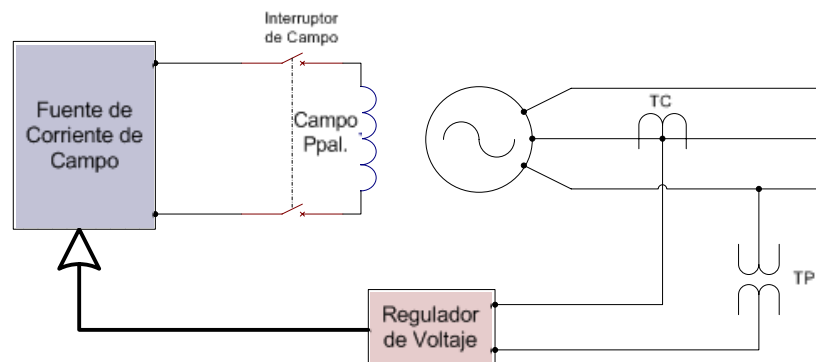


**Figura 3. Excitatriz tipo shunt de excitación independiente**



En general, se tendrán que medir el voltaje y la corriente del generador, para ejercer un control de la corriente de excitación.

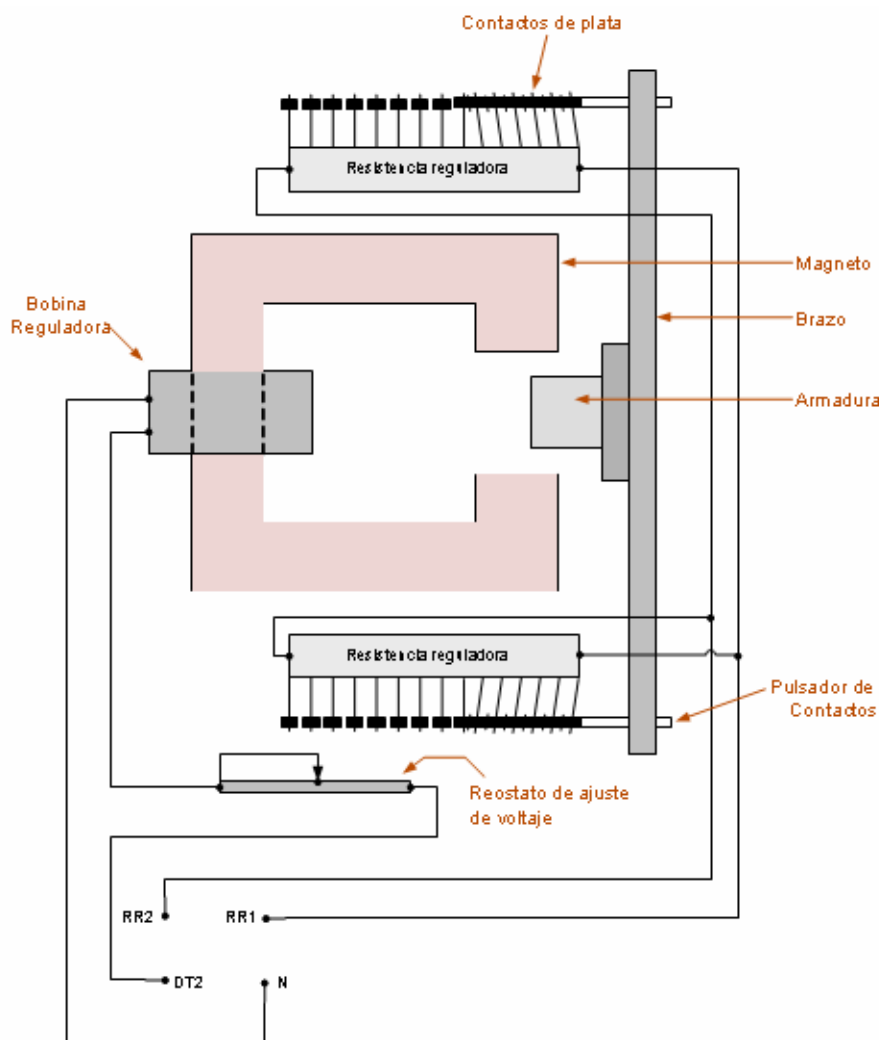
**Figura 4. Esquema de un sistema de excitación**





El control se ejerce a través del regulador de voltaje. A continuación se presenta un esquema de un regulador electromecánico de voltaje, en la figura 5.

**Figura 5. Diagrama esquemático de un regulador de voltaje**



El regulador de voltaje de la figura 5 corresponde a un regulador **SRA-3 Silverstat** de la **Westinghouse**.

En un extremo de la trayectoria todas las laminillas están separadas y no se tendrá cortocircuitado ningún elemento resistivo, por tanto se presenta la máxima resistencia en el circuito de campo. Cuando se cortocircuitan todos los elementos, la resistencia es mínima en el circuito.



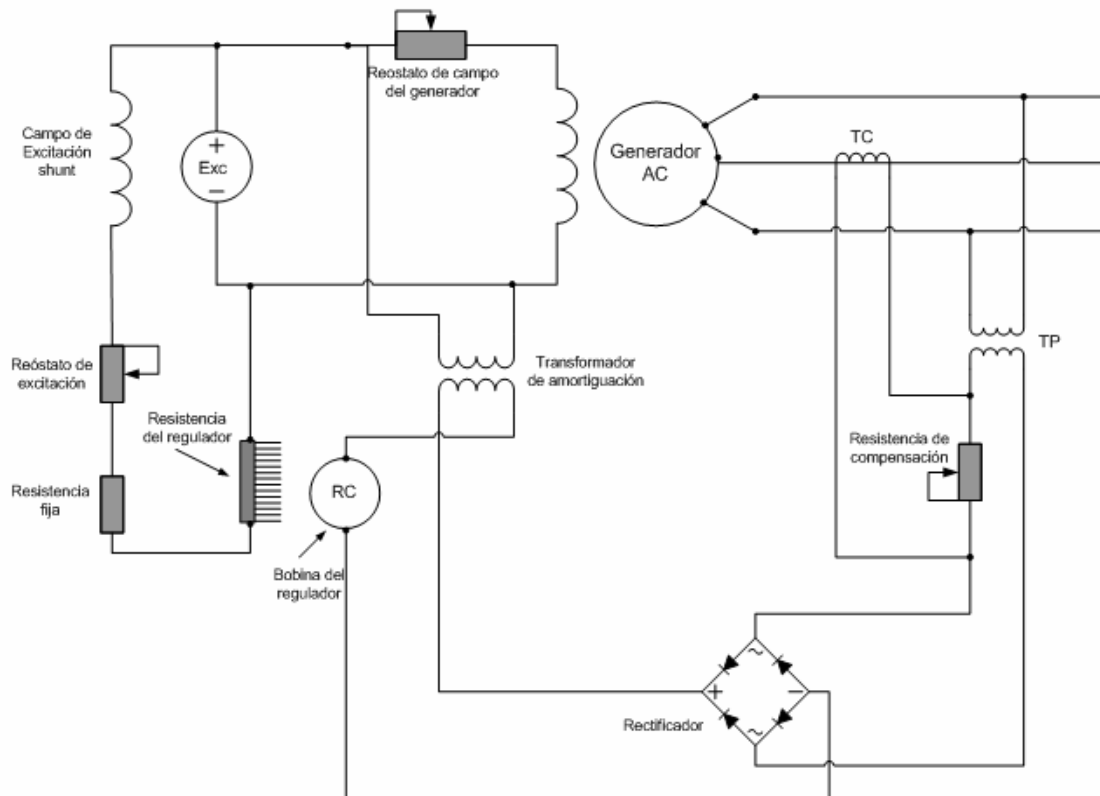
También existe la posibilidad de efectuar un ajuste manual del voltaje al variar el reóstato de campo. El regulador puede sostener un valor intermedio de resistencia.

La velocidad de operación depende de la magnitud de la rata de cambio de la fuerza de operación. Con una caída de voltaje súbita, entre 10% y 12%, el tiempo requerido por el regulador para remover toda la resistencia del circuito de campo es aproximadamente 0.05 segundos ó 3 ciclos sobre una base de 60.

Para un valor dado de voltaje regulado y de carga sobre la máquina a regularse existe un valor correspondiente de resistencia requerida en el circuito de campo y en consecuencia una posición del brazo de la armadura.

La resistencia fija se utiliza como limitadora, tal que no se supere un voltaje de techo.

**Figura 6. Sistema de excitación con regulador de voltaje incluido**



La resistencia de compensación se usa para suministrar una corriente cruzada de compensación durante la operación en paralelo o para obtener la compensación de voltaje en la línea.





La corriente de excitación del generador puede regularse de dos formas: (i) cambiando el voltaje de la excitatriz, o, (ii) manteniendo constante el voltaje y cambiando la resistencia del campo del generador.

**Amortiguación.** Se logra a través de un transformador conectado como se muestra en la figura 6. El transformador es de un tipo especial, posee un pequeño *gap* de aire en el laminado. Solamente actúa cuando se presenta cambio en la corriente de excitación.

**Operación en paralelo.** Es necesario que exista un medio que asegure el reparto de potencia reactiva entre los generadores. Se sabe que el reparto de kW se controla por medio del regulador de velocidad y por lo tanto es independiente de la excitación del generador. Con el objetivo de evitar la circulación de corrientes reactivas entre los generadores que operan en paralelo, se adopta una *compensación de corriente cruzada*. La compensación se logra produciendo una ligera caída del voltaje regulado cada vez que se incremente la corriente reactiva. Para kilovares en atraso, la caída de voltaje a través de la resistencia se suma al voltaje energizando el regulador y sustrayendo kilovares en adelanto, acción que tiende a causar una subexcitación para kilovares en atraso y una sobreexcitación para kilovares en adelanto. De esta manera cada generador tiende a evitar la circulación de potencia reactiva y automáticamente se la reparten en forma proporcional.

**Sistemas de excitación electrónicos<sup>1</sup>.** Las investigaciones muestran que si el voltaje de campo del generador puede controlarse de manera proporcional al error de velocidad instantáneo, entonces pueden producirse torques amortiguadores considerables tendientes a mejorar la estabilidad transiente y dinámica (incluyendo la denominada estabilidad de estado estable).

El error de velocidad será el obtenido con respecto a la velocidad promedio del sistema.

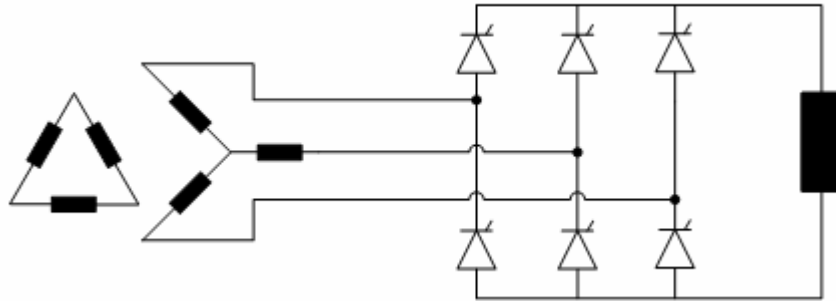
---

<sup>1</sup> WOOLDRIDGE, Peter A. B. y BLYTHE, Allan L. **Consideration affecting the design philosophy of solid state exciters.** En : **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems.** Vol. PAS-87, No. 5 (May 1968); p. 1288-1298.

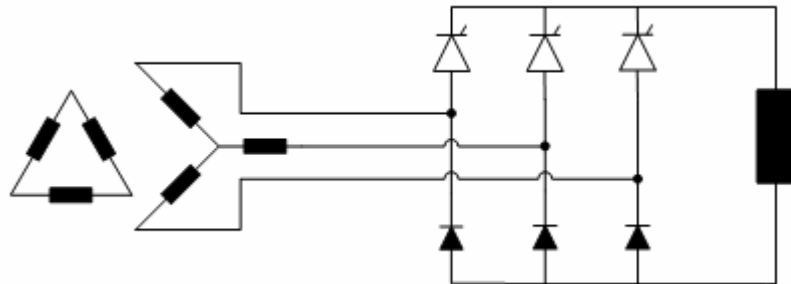


## CIRCUITOS RECTIFICADORES

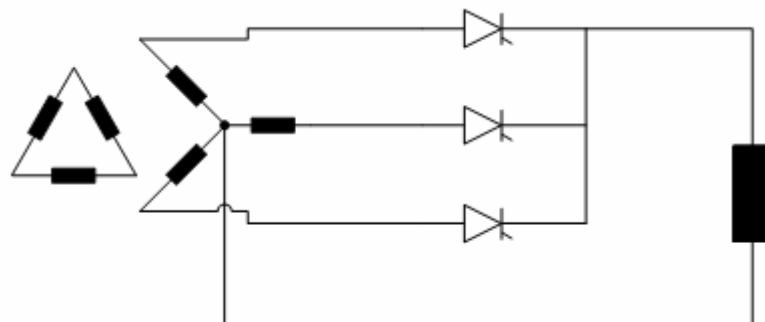
**Figura 7. Circuito uniconvertidor**



**Figura 8. Circuito semiconvertidor**



**Figura 9. Circuito trifásico de una vía**



Los circuitos de las figuras 7 y 8 son los denominados de doble vía o más popularmente conocidos como circuito puente. La principal diferencia en acción



entre el circuito uniconvertidor y el semiconvertidor es que un uniconvertidor puede programarse para producir un voltaje inverso al que normalmente suministra en sus terminales. Dado que la corriente de carga es directa, puede hacerse la inversión. El semiconvertidor no puede invertir bajo ninguna condición.

El semiconvertidor no puede descargar la energía almacenada en una carga inductiva a una rata mayor que la regulada por la constante natural de tiempo de la carga del circuito. El uniconvertidor puede forzar la corriente a cero rápidamente por inversión.

El circuito trifásico de una vía de la figura 9, es de bajo costo. Su aplicación está limitada a excitaciones tipo shunt donde el voltaje de techo no exceda 350 voltios.

### **FACTOR DE INTERFERENCIA TELEFÓNICO (TIF)**

Los convertidores son dispositivos que inyectan armónicos al sistema de corriente alterna debido a la operación de los elementos de tiristores. La generación de armónicos depende de la operación del propio rectificador y de la carga que alimenta. Los armónicos de corrientes provocan la distorsión de los voltajes en los nodos de alimentación, esta distorsión en el voltaje provoca la mala operación de dispositivos electrónicos muy sensibles, tales como equipos de control y procesos, de cómputo y controladores lógicos programables.

La selección de un circuito rectificador puede verse influenciada por severas restricciones del *Factor de Interferencia Telefónico (TIF)*. Los armónicos en la salida de un rectificador generalmente son de un valor despreciable, pero incrementan el TIF propio del generador, debido al efecto de los arrollamientos inductivos del campo.

### **CONSIDERACIONES GENERALES DE DISEÑO**

**Refrigeración.** Debe suministrarse convección de aire forzado. Cualquier falla de los ventiladores producirá un disparo de la máquina, y, dada la baja constante térmica de los tiristores, se recomienda duplicar el sistema de ventiladores. Además se deberá detectar muy confiablemente la falla de los ventiladores, para ello se recomienda adicionar un grupo de sensores de respaldo. Para grandes excitadores se utiliza un sistema de refrigeración por agua (con intercambiadores de calor).

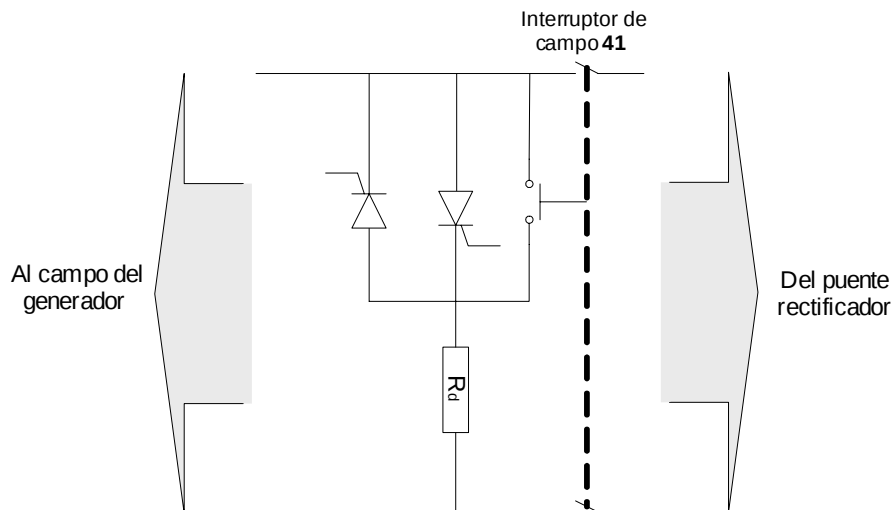


**Disposición modular.** Deberá disponer de un puente extraíble y redundante, por lo tanto, es necesario que pueda extraerse bajo carga, sin necesidad de sacar de servicio el sistema de excitación.

En contraste con la característica extraíble del módulo, aparece el concepto de accesibilidad en el diseño. Se habla de accesibilidad a todos los componentes importantes, lo cual requerirá un incremento en el tamaño de los espacios para lograr esa accesibilidad; este concepto aplica cuando se disponen los componentes en módulos fijos (no extraíbles).

**Protección de sobrevoltaje para el circuito de campo.** Se denomina circuito *pata de cabra* (**crowbar**) como protección de sobrevoltaje; comprende dos grupos de tiristores conectados en antiparalelo, los cuales se disparan por un elemento semiconductor adecuado, tal como un BOD (**Break Over Diodes**). Si por ejemplo, se induce un voltaje en el rotor (por deslizamiento) éste solamente aumentará hasta que se alcance el umbral del BOD, pues en ese punto se disparan los tiristores y la potencia suministrada se disipa a través de  $R_d$ .

**Figura 10. Circuito protector de sobretensión**



**Limitador de excitación mínima.** El propósito de este limitador es mantener la salida del generador dentro de su curva de capacidad cuando éste se aproxima a los límites de la estabilidad dinámica, fijándose automáticamente la excitación a un nivel mínimo donde la estabilidad es asegurada.



**Limitador de excitación máxima.** El propósito de este limitador es mantener la salida del generador cuando se alcanza la capacidad térmica del rotor del generador, fijándose automáticamente la excitación a un nivel donde la sobreexcitación se controla para que la unidad no salga de su curva de capacidad.

**Limitador de corriente del estator.** Como su nombre lo indica, el propósito de este limitador es limitar la corriente del estator del generador a un valor preestablecido, básicamente en la zona que corresponde a la máxima potencia activa y en donde no opera el limitador de mínima excitación, ni tampoco el limitador de máxima excitación.

**Compensador de corriente reactiva.** En una situación donde hay varios alternadores que operen en paralelo, es necesario proporcionar a cada regulador una compensación por cargas reactivas. Así se asegura que las unidades permanezcan estables, y la potencia reactiva se comparta proporcionalmente entre los diferentes generadores. Si el generador absorbe potencia reactiva la referencia de voltaje se aumenta para compensar la potencia reactiva absorbida y en el caso contrario, se disminuye.

**Sobrevoltaje.** El voltaje de bloqueo de un tiristor para excitación shunt, deberá ser mucho mayor que el voltaje de techo o voltaje ceiling requerido, debido a los sobrevoltajes del sistema. La excitación shunt experimentará todas las sobretensiones que aparezcan en los terminales del generador por cualquier razón.

Sobrevoltajes dinámicos debidos a rechazos de carga, seguidos por sobrevelocidades, pueden controlarse por la acción del regulador y mantenerse en un nivel razonable. Si los sobrevoltajes se deben a situaciones de auto-excitación, éstos son muy serios si no existe un control adecuado de la excitación tendiente a reestablecer el voltaje en las terminales del generador. Un limite razonable deberá fijarse y especificarse, tal que en este punto se produzca un disparo del generador.

**Corriente nominal y sobrecorrientes.** Se debe tener en cuenta que los tiristores poseen una constante de tiempo térmica relativamente pequeña; cualquier corriente de carga que pueda ser sostenida por más de 100 segundos deberá ser considerada como continua. Aparentemente el comportamiento del generador no se ve afectado por incrementar la corriente hasta un cierto punto (la corriente de campo). Se recomienda fijar un límite de corriente.

Como consecuencia de fallas en el sistema, se inducen en el campo corrientes de sustancial magnitud. Las fallas trifásicas son las más severas. Estas corrientes



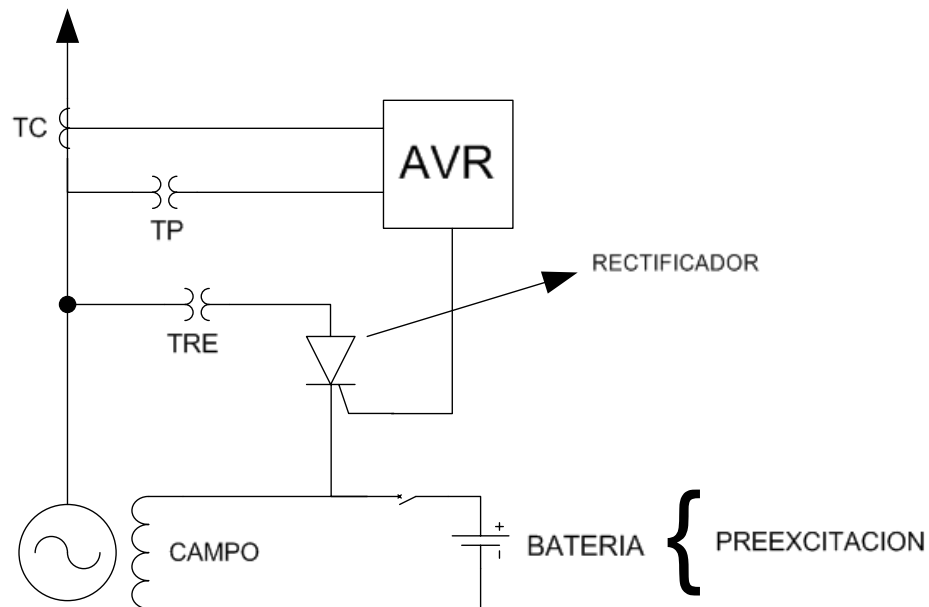
pueden fluir a través del rectificador y su magnitud y duración igualmente pueden llegar a ser parte de la capacidad nominal del rectificador.

## SISTEMAS DE EXCITACIÓN ESTÁTICOS

Dentro de los elementos constitutivos de un sistema de excitación estático están:

1. Regulador automático de voltaje (control y circuitos de disparo) incluyendo sistema de protección y monitoreo.
2. Tiristores rectificadores (convertidor estático).
3. Interruptor de campo (sistema de supresión del campo)\*.
4. Transformador de excitación.

**Figura 11. Esquema básico de un sistema de excitación estático**



El voltaje secundario del transformador de excitación, se determina por el  $V_{\text{ceiling}}$  requerido y su corriente secundaria por la máxima corriente continua que se requiere suministrar al campo.

\* Normalmente con circuito de preexcitación.



La siguiente es una lista de comprobación final a tener en cuenta en las especificaciones de los sistemas de excitación estáticos:

1. Disposición de canales de control, automático y manual.
2. Cambio automático a canal manual de control en el evento de falla del control automático (circuito seguidor).
3. Metro de balance para una transición suave entre canales.
4. Controlador de corriente de campo para el control manual.
5. Límite de voltaje, estabilización de deslizamiento.
6. Limitador de ángulo de carga.
7. Limitador de corriente de campo.
8. Control (limitador) de mínima corriente: protección de subexcitación.
9. Protección electrónica para el transformador de excitación y los tiristores.
10. Protección de sobrecorriente y cortocircuito.
11. Sistema de monitoreo y alarmas.

