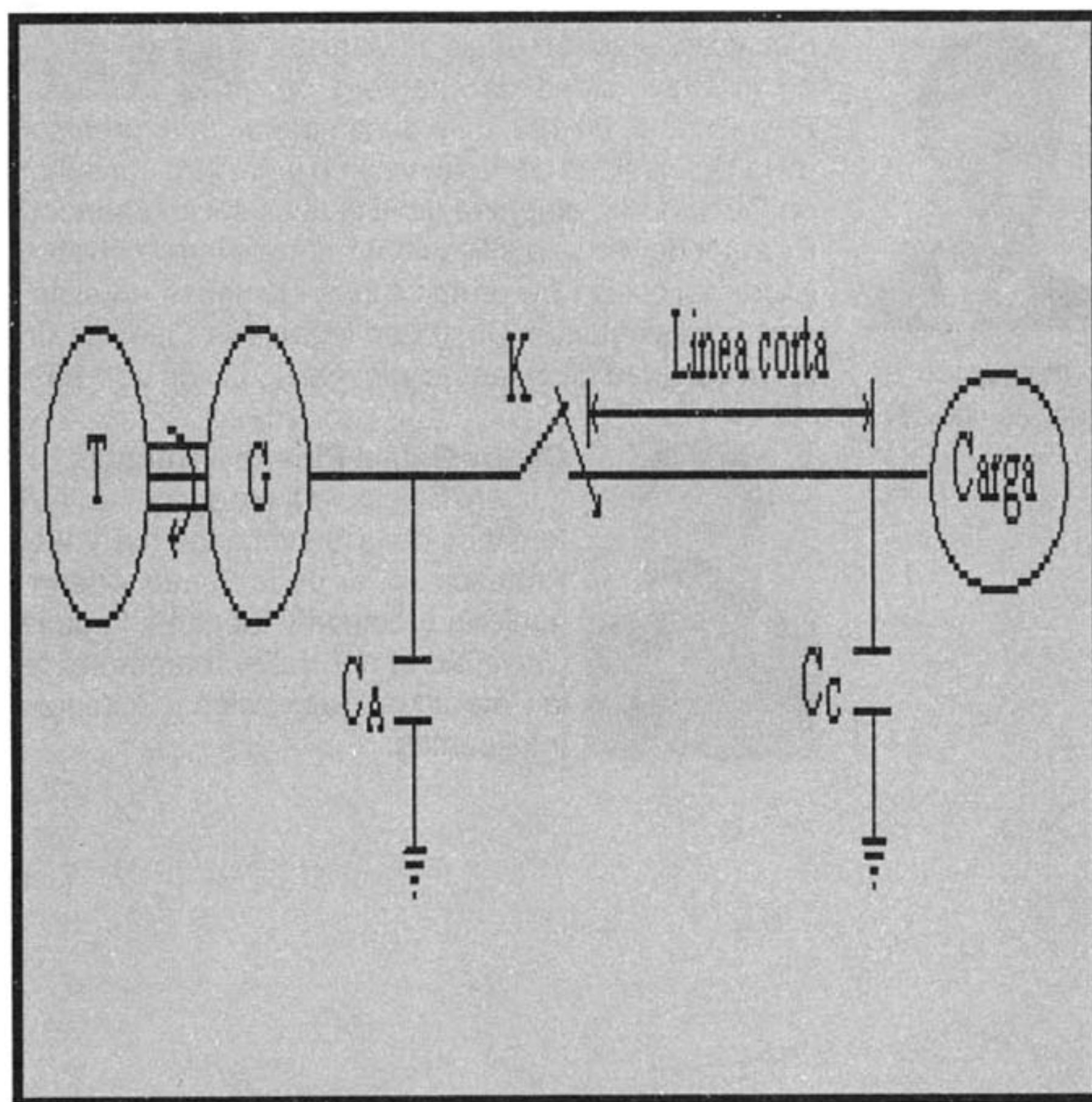


Regulador de tensión para un generador asíncrono



RESUMEN

Este artículo muestra el resultado de una serie de pruebas de laboratorio, encaminadas a sustituir el regulador electrónico de tensión en motores asíncronos, utilizados como generadores en microcentrales hidroeléctricas en zonas aisladas, por una opción sencilla y práctica de construir, la cual consiste en colocarle a cada carga el condensador requerido para compensar sus reactivos.

ABSTRACT

This article shows results on a series of lab tests intended to substitute the electronic voltage regulator used in asynchronous motors by a simple and practical easy to build system option; this motors are used as generators in micro-hydroelectric generation plants located in isolated areas unable to get any connection to a bigger generation plant. This option consist of adding a required condenser to each load in orden to compensate the reactive energy component.

☐ **Ramiro Ortiz Flórez, M.Sc.**
Ingeniero Electricista
Profesor Asociado
Universidad del Valle

☐ **Diego Alejandro Trejos Pérez**
Ingeniero Electricista

☐ **Alfredo Sánchez Bocanegra**
Ingeniero Electricista

☐ **Angel García Baños, Ph.D.**
Ingeniero de Telecomunicaciones
Profesor Titular
Universidad del Valle

1. INTRODUCCIÓN

El potencial hidroenergético en el país, a nivel de microgeneración, es un factor determinante en el desarrollo socioeconómico de muchas regiones aisladas, en lo que respecta al mejoramiento de la calidad de vida, servicios públicos, desa-

rollo tecnológico en industrias agrícolas, pesqueras, ganaderas, entre otras.

En décadas pasadas, la mayoría de los municipios disponían de su pequeña central hidroeléctrica y en las fincas se instalaban microcentrales construidas con recursos económicos propios y parte de la ingeniería de diseño y construcción era nacional. Además de solucionar su problema de energía eléctrica se preservaba el medio ambiente al cuidar la cuenca, la cual es fuente energética.

Estos pequeños aprovechamientos fueron, poco a poco, absorbidos en la década de los setenta por grandes proyectos hidroeléctricos, cayendo en el olvido las zonas aisladas o no interconectadas. Estas regiones se caracterizan por su difícil acceso, bajo nivel socioeconómico, sistemas primarios de trabajo y carencia de energía eléctrica, entre otros.

Llevar el servicio de energía eléctrica a una zona aislada exige además de la disponibilidad del recurso hidroenergético, que sus equipos sean confiables, robustos y sencillos; estas características son propias de la turbina y del generador asíncrono, sin embargo en lo que respecta a la regulación de frecuencia y regulación de tensión, existen limitantes tecnológicas, debido a que son equipos electrónicos y su construcción exige de unas condiciones de humedad, temperatura y el mantenimiento se realiza con personal especializado.

Debido a la importancia del regulador de tensión para una generador asíncrono en una microcentral hidroeléctrica aislada, empezamos a investigar la forma de construir un regulador robusto, sencillo y confiable.

2. REGULACIÓN DE TENSIÓN

El generador asíncrono se caracteriza porque no genera sus reactivos, por tal motivo requiere de un banco de condensadores, para crear su campo magnético y atender la demanda. Este banco está controlado por un dispositivo electrónico, encargado de conectar los condensadores necesarios de acuerdo con la ge-

neración y la demanda. En la figura 1 se ilustra la forma de control de reactivos, operado por un circuito de control simple.

El funcionamiento de este sistema de regulación y sus similares es el siguiente:

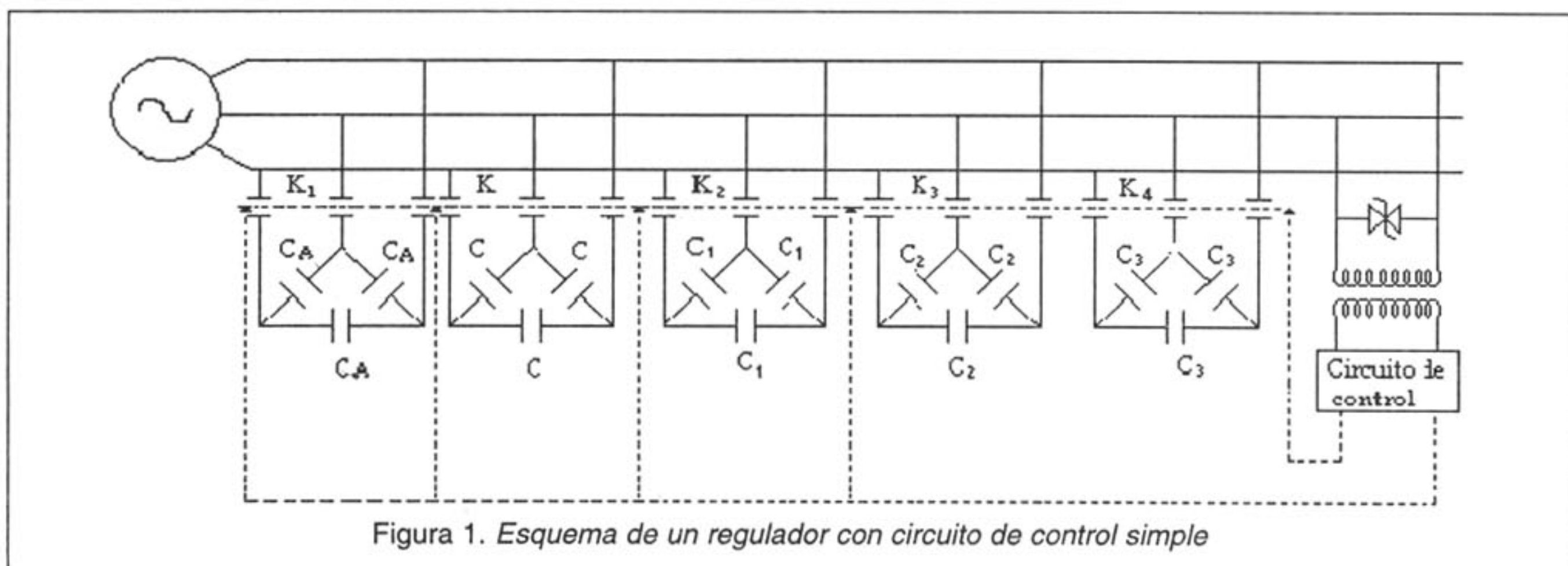
- Se pone a girar la turbina acoplada al generador hasta tomar la velocidad nominal.
- Una vez se tiene la velocidad nominal, se conectan los condensadores de arranque C_A . Ellos se caracterizan por que tienen un valor superior en el momento de excitar la máquina, esto produce en el generador una tensión superior a la nominal
- En ese momento el regulador debe reducir los reactivos capacitivos hasta el valor nominal de tensión; es decir desconectar los condensadores de arranque C_A y conectar los condensadores C para una tensión nominal.
- Después de estabilizarse la tensión, se puede aumentar la energía mecánica en la turbina, para que el generador pueda entregar energía activa.
- La demanda puede disponer de energía reactiva a través de un banco de condensadores (C_1, C_2, C_3) que son conectados o desconectados por el regulador, según la necesidad.

3. EXPERIENCIA EN EL LABORATORIO

En nuestro laboratorio de máquinas eléctricas se montó para su investigación un motor de inducción trifásico, al cual se le conectó un motor de corriente continua como primomotor y eléctricamente se conectó un banco de condensadores.

Se inició la investigación del diseño y construcción de un regulador de tensión, que debería cumplir con las siguientes especificaciones:

- Cuando el grupo está girando a la velocidad nominal, el regulador debe conectar un condensador de arranque con un valor superior en reactivos a la tensión nominal.
- En el instante en que se tiene en bornes del genera-



dor la tensión nominal, el regulador debe desconectarlo y conectar un condensador proporcional a la tensión nominal.

- Una vez esta conectada la carga, el regulador debe actuar para conectar o desconectar proporcionalmente condensadores según la demanda.

Estas características de regulación exigen que en el banco de condensadores se dispongan de unidades de los siguientes valores:

- Un condensador de arranque para la excitación inicial del generador que le proporciona una tensión superior a la nominal en un treinta por ciento.
- Un condensador para mantener la tensión nominal.
- Unos condensadores que atienden la demanda de potencia reactiva.

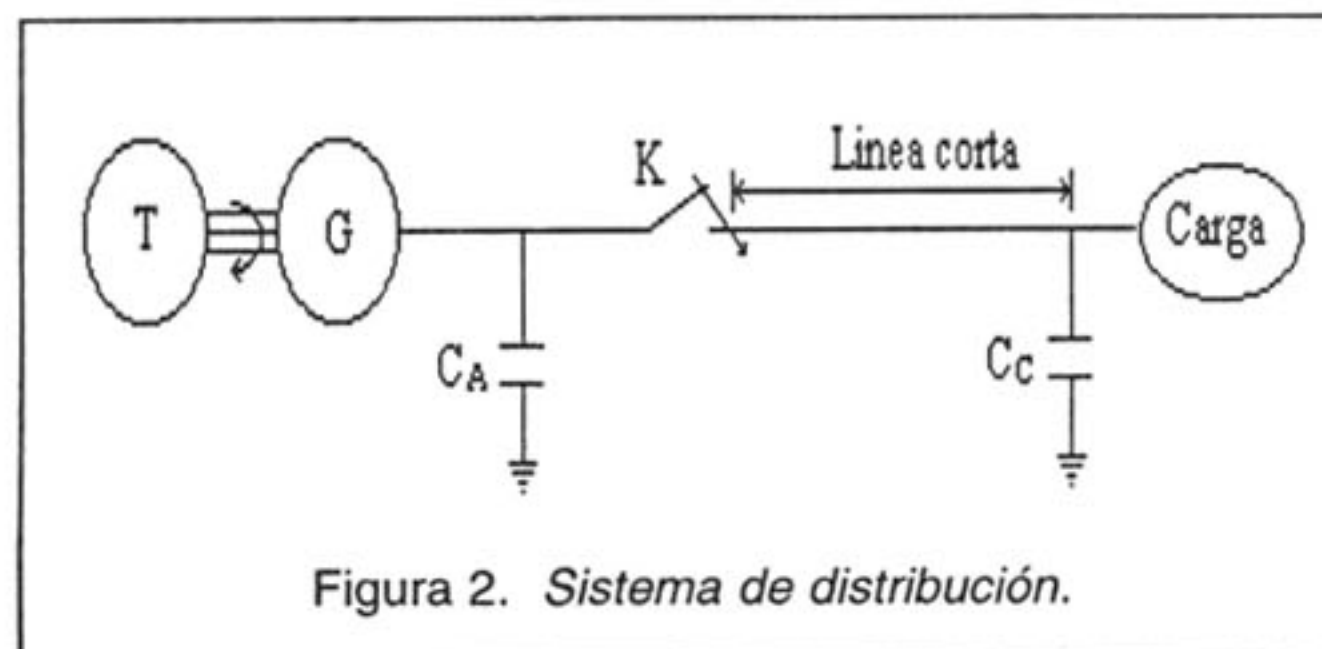
Como el objetivo de construir un regulador robusto, sencillo y confiable, que realizara las funciones anteriores nos exigía utilizar un dispositivo electrónico. Este debe censar el voltaje para realizar funciones de conexión y desconexión de condensadores en el lado de generación o en la demanda.

En su fase inicial estas operaciones de conexión y desconexión se realizaron manualmente, y en el proceso se observó que en el lado de generación, si el condensador proporcional a la tensión nominal inicia conectado al generador desde el primer momento en que empieza a girar la turbina, es posible suprimir el condensador de excitación. Esto es muy importante. Ya que se suprimió una de las operaciones, se buscó la posibilidad de conectarles a cada una de las cargas un condensador proporcional a sus reactivos, que se conectaban o desconectaban simultáneamente con el interruptor de la carga. Esta variable también fue posible.

Las anteriores observaciones nos permitieron regular tensión en un generador asíncrono sin el apoyo de la electrónica a nivel de microgeneración.

4. REGULADOR DE TENSIÓN

El regulador es diseñado para trabajar en microcentrales hidroeléctricas, está constituido por una turbina, que está acoplada al generador de inducción autoexcitado (G.I.A.E.) el cual se conecta con la carga a



través de una línea corta. Como generador de energía eléctrica se utilizará un motor de inducción trifásico conectado en estrella (Y) el cual trabajará como G.I.A.E. Debido a que el generador de inducción no produce los reactivos que necesita para su autoexcitación se debe acoplar en paralelo a sus terminales un banco de condensadores. La energía reactiva requerida por las cargas se le suministra a través de condensadores conectados en paralelo a cada una de ellas.

Este sistema (figura 2) se diseñó para trabajar en un circuito de línea corta donde el efecto capacitivo entre línea y tierra sea tan pequeño que se puede omitir por completo, teniendo una pérdida de exactitud mínima y sólo se requiere considerar las pérdidas ocasionadas por el conductor a través de la longitud de la línea.

Se seleccionó una conexión para los condensadores del generador en delta (Δ), puesto que así circulará una corriente menor a la corriente de línea por cada condensador, lo que permite manejar mayor potencia. Se debe considerar su capacidad de aislamiento, ya que en esta conexión van a estar sometidos a la tensión nominal.

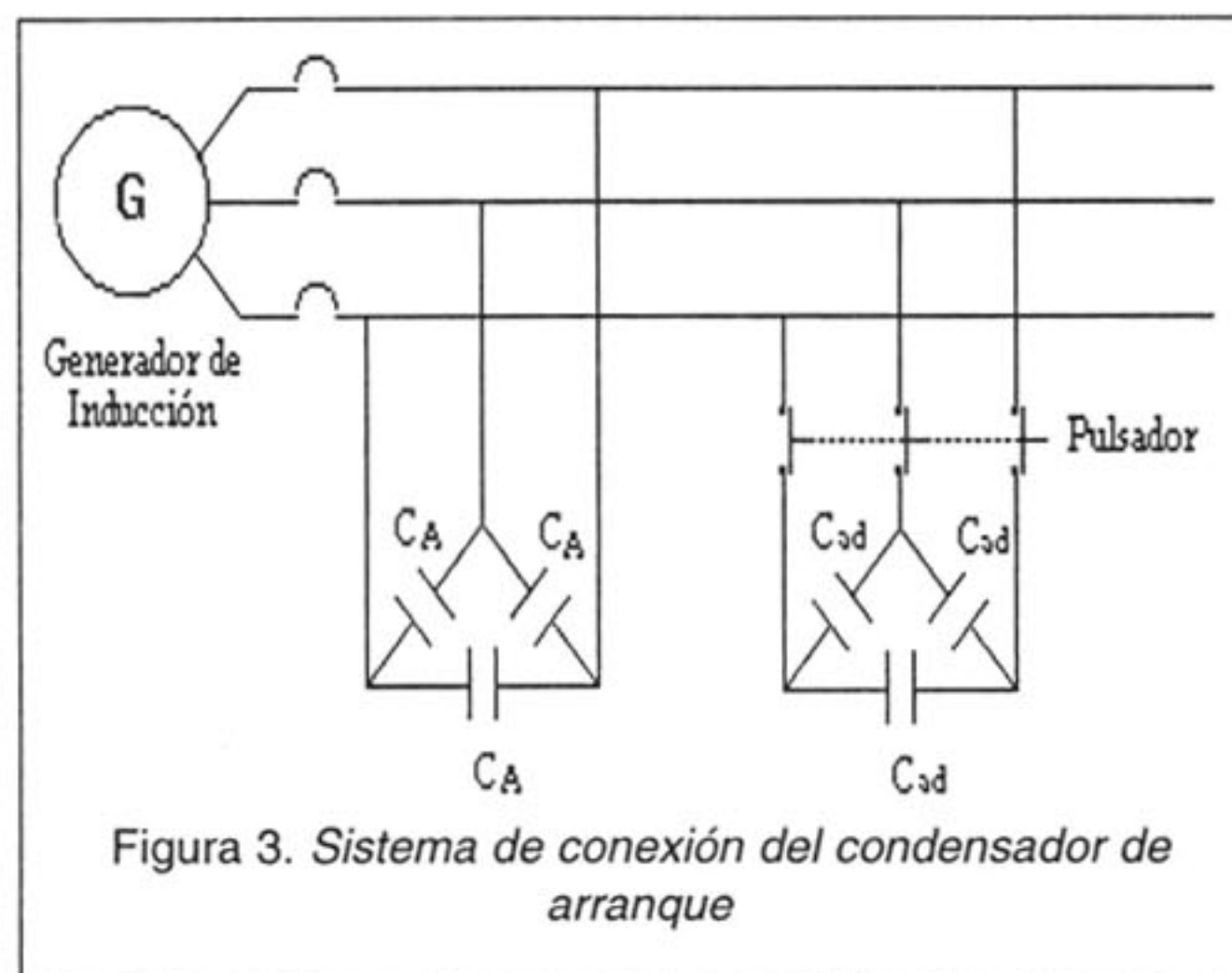
El rango de voltaje permitido para el sistema se optó por $\pm 10\%$ del voltaje nominal del generador.

5. CONDICIONES DE TRABAJO DEL G.I.A.E.

Los regímenes de trabajo normal del generador asíncrono son: el arranque, el régimen de vacío y el funcionamiento con cargas balanceadas y desbalanceadas.

5.1. Régimen de arranque

El arranque del generador de inducción requiere de la conexión directa de un condensador de arranque (C_A) que consta de dos bancos de capacitores que se conectan en paralelo. Ellos son un condensador de autoexcitación C_A y un condensador adicional C_{ad} , como se indica en la figura 3.



El condensador de arranque es igual a:

$$Carranque. = C_A + Cad. \quad [\mu f] \quad (1)$$

Donde:

C_A - Condensador de autoexcitación.

Cad - Condensador adicional.

Cuando la máquina tiene un proceso de operación continuo, el arranque se puede efectuar con el solo condensador de autoexcitación C_A .

Puede ser necesario conectar el condensador adicional Cad , cuando al arrancar la máquina con el condensador de autoexcitación C_A , no se ha conseguido el voltaje nominal y se desconecta inmediatamente después del proceso de arranque. El dejarlo conectado genera una sobretensión.

El condensador de autoexcitación C_A se calcula igualando la potencia reactiva que consume la máquina de inducción como motor con la potencia reactiva que debe ser suministrada por los condensadores, es decir:

$$Q_M = Q_C \quad [var] \quad (2)$$

donde:

$$Q_C = \frac{3 \cdot U_L^2}{X_C}$$

entonces:

$$C_A = \frac{Q_M}{3 \cdot U_L^2 \cdot w} \quad [\mu f] \quad (3)$$

donde:

Q_M : Potencia reactiva que consume el motor de inducción [Var].

Q_C : Potencia reactiva de los condensadores [Var].

w : 377 rad/seg a una frecuencia 60 Hz

U_L : Tensión de línea [V].

X_C : Reactancia de los condensadores de autoexcitación [W].

El condensador adicional Cad equivale a:

$$Cad. = 1/5 C_A \quad [\mu f] \quad (4)$$

De tal forma el condensador de arranque $Carranque$ es igual a:

$$Carranque = \frac{2}{5} \frac{Q_M}{U_L^2 \cdot w}$$

5.2. Régimen de vacío

En caso de que el generador de inducción se quede sin carga por un tiempo prolongado, debe permanecer conectado solamente el condensador de autoexcitación a los terminales del generador.:

5.3. Régimen de carga

Con el fin de evitar la caída de tensión en terminales del G.I.A.E el sistema de regulación para la carga conecta condensadores en paralelo; ellos se colocan en bloque para las cargas activas (figura 4) e individuales para aquellas que necesitan de energía reactiva para su funcionamiento (figura 5).

Conectar al sistema cargas activas como: bombillos incandescentes, planchas y otros, hasta demandar el valor nominal de corriente activa del generador de inducción, hace que la tensión en terminales disminuya en forma proporcional a la carga conectada, lo que provoca una disminución de corriente por los condensadores de autoexcitación C_A , que a su vez permite

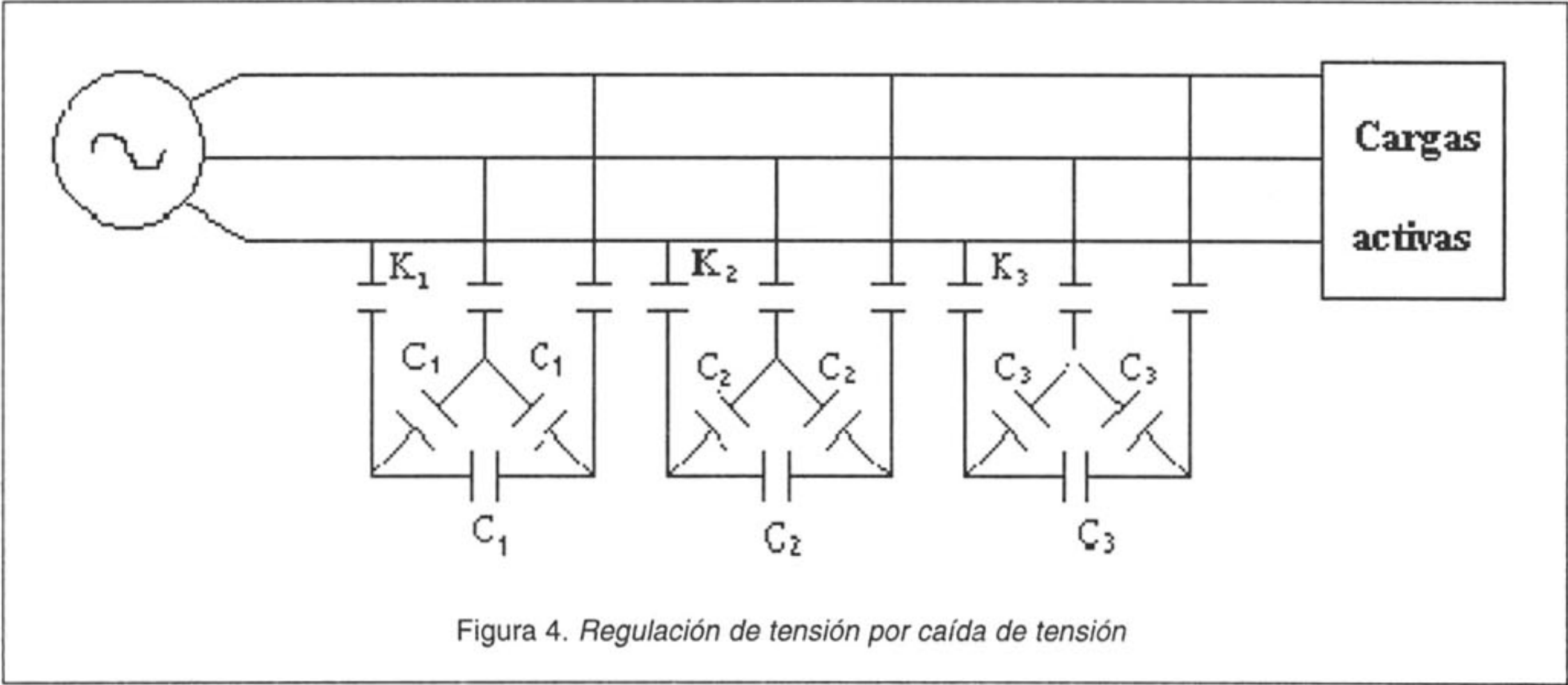


Figura 4. Regulación de tensión por caída de tensión

una mayor caída de tensión en terminales de la máquina, sacándola de esta forma de estabilidad. Por lo tanto a medida que se aumenta la carga activa debe conectársele también un grupo de condensadores en paralelo (Cactivo) para evitar la desexcitación de la máquina (ver figura 4).

Este grupo de condensadores (Cactivo) consta de tres bancos trifásicos de capacitores (Cactivo 1, Cactivo 2 y Cactivo 3) que se conectan en forma escalonada y proporcional a la demanda de carga. Cada uno de los bancos tiene el siguiente valor:

$$\begin{aligned} C_{activo1} &= C_{activo2} = \\ C_{activo3} &= 0.15 C_A \quad [\mu f] \quad (5) \end{aligned}$$

De tal forma que el Grupo de condensadores activos **Cactivo** es igual a:

$$\begin{aligned} C_{activo} &= C_{activo1} + C_{activo2} + \\ &C_{activo3} \quad [\mu f] \quad (6) \end{aligned}$$

Las cargas inductivas, bien sean monofásicas o trifásicas, como motores, neveras, lamparas fluorescentes y otros, tendrán conectados el correspondiente condensador para sus reactivos, como se indica en la figura 5. Un valor aproximado para cada una de estas cargas se indica en la tabla 1.

El condensador que necesita la carga inductiva se calcula igualando las potencias reactivas del condensador y la inductancia, de la siguiente forma:

$$Q_L = Q_C \quad [var] \quad (7)$$

donde:

$$Q_L = \frac{3 \cdot U_L^2}{X_L} \quad y \quad Q_C = \frac{3 \cdot U_L^2}{X_C}$$

- Q_L - Potencia reactiva de la inductancia [var].
- Q_C - Potencia reactiva del condensador [var].
- X_L - Reactancia inductiva [Ω].
- X_C - Reactancia capacitiva [Ω].
- U_L - Tensión de línea [V].
- w - Velocidad angular para una frecuencia de 60 Hz [rad/seg].

reemplazando X_L y X_C

$$Q_L = \frac{3 \cdot U_L^2}{w \cdot L} \quad y \quad Q_C = 3 \cdot U_L^2 \cdot w \cdot C$$

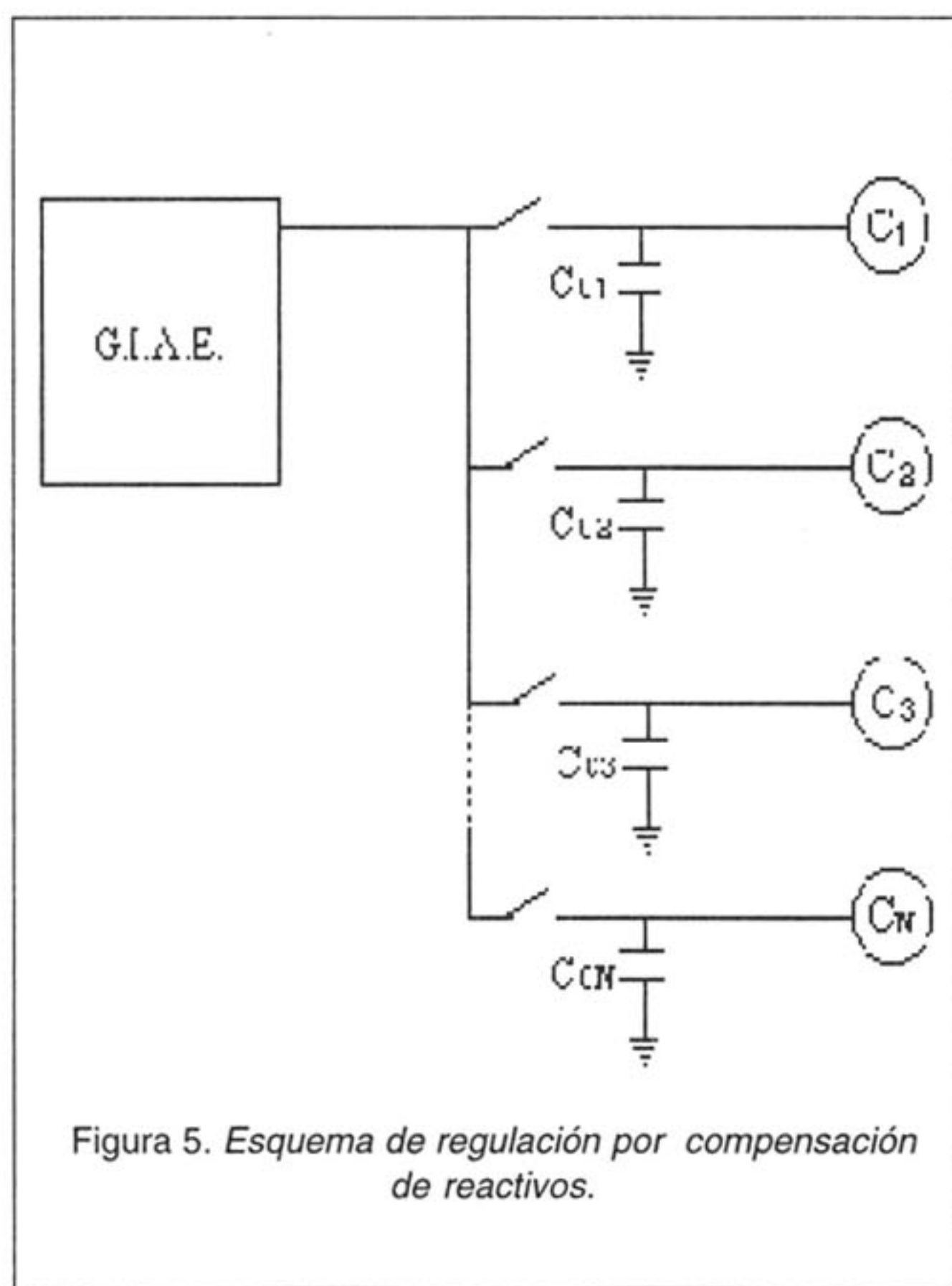


Figura 5. Esquema de regulación por compensación de reactivos.

Igualando Q_L y Q_C y despejando C tenemos que el capacitor por fase es igual a:

$$C = \frac{1}{w^2 \cdot L} \quad [\mu f] \quad (8)$$

donde:

- C - capacitor por fase [μf].
- L - inductancia que se quiere compensar [mH].
- w - velocidad angular [rad/seg].

Para el caso de motores:

$$C_C = \frac{Q_M}{K \cdot w \cdot U_L^2} \quad [\mu f] \quad (9)$$

donde:

- $K = 1$, motores monofásicos.
- $K = 3$, motores trifásicos.

La capacidad de carga del generador para motores se ve disminuida por la corriente de arranque de ellos, ya que esta puede superar fácilmente la corriente nominal del G.I.A.E. por lo tanto se debe considerar este parámetro para la conexión de motores. El criterio para

Tabla 1. Tipos de cargas con su condensador de compensación por fase.

Artículo	V (volt)	I (amp)	Fases	P (watt)	Q (vars)	F.P.	Cc (uf)	Conexión de CC
Motor de 0.4 H.P	220	1.7	3	298.4	575.17	0.46	10.5	Delta
Motor de 0.6 H.P.	220	2.3	3	447.6	753.43	0.51	13.76	Delta
Motor de 0.9 H.P.	220	3.1	3	671	971.89	0.57	17.75	Delta
Motor de 1/2 H.P.	115	10.4	1	373	1136.34	0.31	227.9 1	Paralelo
Motor de 1/3 H.P.	115	8.6	1	248.66	957.22	0.25	191.9 8	Paralelo
Motor de 1/3 H.P.	125	1.25	1	240	491.4	0.38	83	Paralelo
Motor de 0.19 H.P.	120	3	1	200	311.8	0.5	57	Paralelo
Nevera	125	2.1	1	196.87	173.62	0.75	29	Paralelo
Nevera (arranque)	125	15	1	1406.25	1240.2	0.75	210.5	Paralelo
Lámpara	124	1.2	1	148.8	0	1	0	Paralelo
Lámpara (arranque)	124	1.25	1	137.95	70.67	0.89	12.1	Paralelo

conectar un motor al sistema generador con base a su corriente nominal es:

$IM = 25\% IG$ [A] (10)

donde:
IM - Corriente nominal de motor [A].
IG - Corriente nominal del generador [A].

Debido a que es muy difícil tener las cargas por fase balanceadas el sistema permite un porcentaje de desbalance de ± 38 % de la corriente de línea del generador.

6. CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN

Para que el regulador tenga un buen desempeño tenga en cuenta los siguientes parámetros:

- La demanda debe ser menor que la potencia que entrega el sistema turbina-generador.
- La Velocidad de la turbina debe ser mayor que la velocidad de placa del motor.
- La frecuencia debe ser en lo posible constante.
- El sistema funciona para sistemas de línea corta.
- La oscilación en el voltaje de ± 10 % del nominal.
- El desbalance no debe ser superior al ± 38 % de la corriente de línea del generador

El procedimiento para la construcción de este regulador de tensión es el siguiente:

1. Calcule correctamente los siguientes condensadores:

C_A : Condensador de autoexcitación
Cad : Condensador adicional.
Cactivo : Condensador activo.
CC : Condensador de compensación.
2. Construya dos tableros de distribución, uno de ellos para el generador y otro para la carga (ver figura 6). El tablero de generación tiene las siguientes características:
 - El selector S1 en la posición 1 conecta el condensador de autoexcitación C_A a los terminales del generador de inducción.
 - El selector S1 en la posición 2 conecta el condensador adicional Cad a los terminales de la máquina sin desconectar el condensador de autoexcitación C_A.El tablero de carga tiene las siguientes características:
 - El selector S2 en la posición 0 no tiene condensadores activos conectados al sistema.
 - El selector S2 en la posición 1, conecta el primer banco de condensadores activos (Cactivo 1).
 - El selector S2 en la posición 2, conecta el segundo

banco de condensadores activo (Cactivo 2), sin desconectar el primero.

- El selector S2 en la posición 3, conecta el tercer banco de condensadores activo (Cactivo 3), sin desconectar los anteriores.

La operación del sistema de distribución de energía eléctrica, empleando el generador de inducción y regulando la tensión por compensación de reactivos es el siguiente:

1. Arranque el generador teniendo el selector en 1 y observe el voltímetro, si la tensión no sube pase el selector a la posición 2 y espere a que la tensión comience a aumentar; cuando el voltímetro mida tensión por encima de la nominal lleve el selector a la posición 1 donde la tensión se estabiliza.
2. Cuando el generador de inducción tiene su voltaje nominal (selector S1 en 1) suba el interruptor (K) para conectar las cargas activas y reactivas al G.I.A.E. asegurándose que cada una tenga su condensador de compensación en paralelo. Si una carga es del 10% de la potencia nominal activa del generador puede ser conectada sin la ayuda del condensador de compensación.
3. Conecte la carga activa progresivamente, manteniendo la frecuencia constante, si la tensión que marca el voltímetro está por debajo del rango permitido, conecte el selector S2 en la posición 1, si aumenta la carga activa y el voltaje se sale del rango ponga el selector S2 en la posición 2, si la demanda continua aumentando hasta llegar a la capacidad nominal del generador y el voltímetro indica que el voltaje se está cayendo ponga el selector S2 en la posición 3.
4. Al desconectar cargas, cerciórese que el conden-

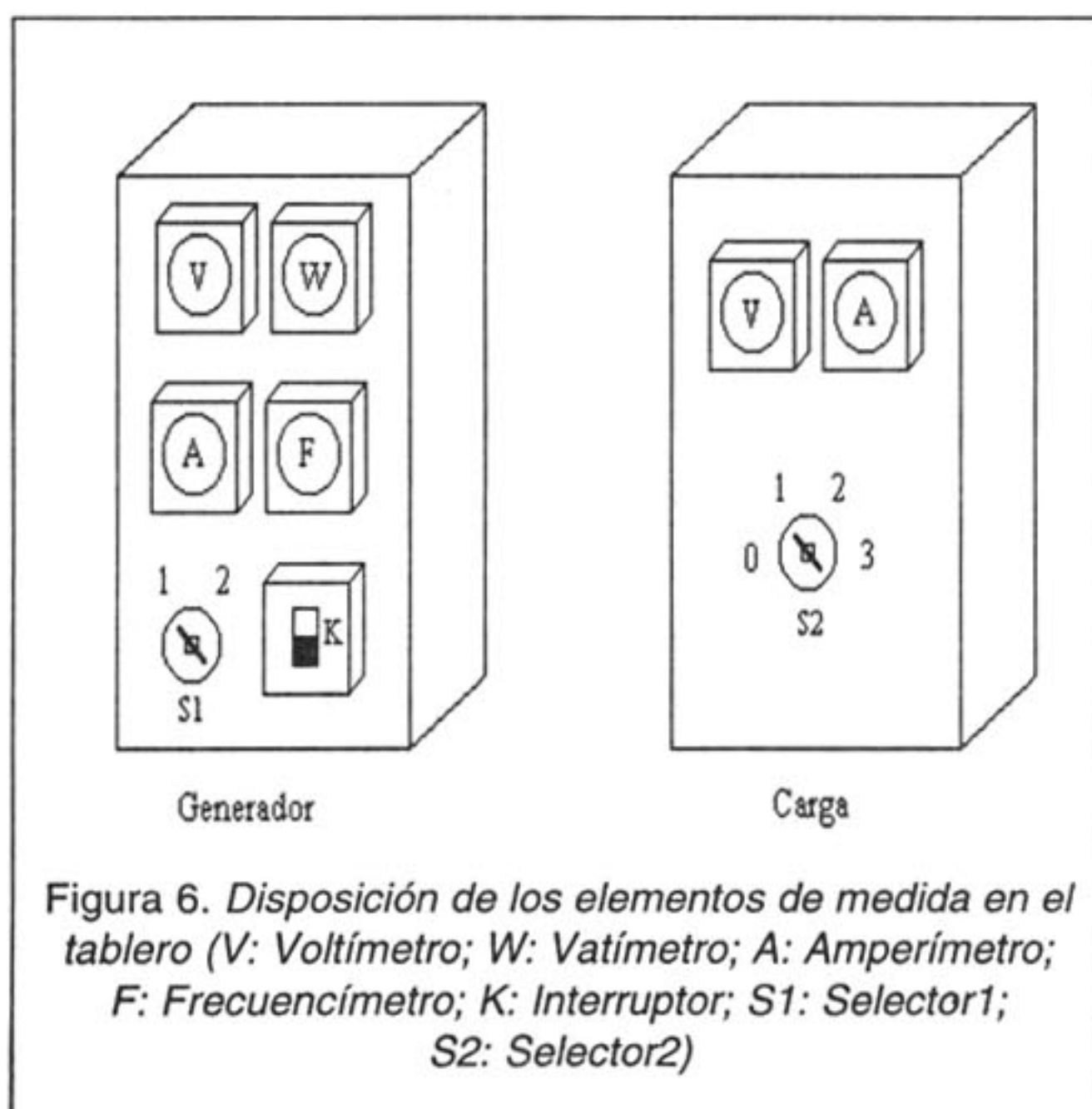
sador de compensación salga simultáneamente con ellas del sistema, con el fin de evitar sobretensiones.

5. Cuando se quiere parar el sistema es recomendable, sacar la carga accionando el interruptor (K) y después desacelerar la máquina motriz.
6. Un corto-circuito en terminales del generador la desexcita, por tal motivo, para conseguir de nuevo la estabilidad en el sistema, después de haber solucionado la falla, es necesario desconectar la carga a través de K. Si el voltaje no evoluciona accione el pulsador para conectar el condensador de arranque *Cad* y conseguir de nuevo la autoexcitación de la máquina, luego siga el procedimiento de arranque anteriormente descrito.

7. CONCLUSIONES

Las conclusiones más sobresalientes obtenidas en el desarrollo del anterior trabajo son:

- Se implementó y ensayó un sistema de regulación de tensión en un G.I.A.E. cumpliendo con las especificaciones de ser sencillo, robusto, económico y de fácil manejo, cumpliendo con el objetivo propuesto.
- Con base en el análisis físico de los fenómenos del G.I.A.E. ante cargas diferentes, se desarrolló una filosofía de regulación sencilla, basada únicamente en la compensación de reactivos para las cargas que la necesitan.
- En este sistema de regulación se eliminó el control electrónico con lo que se consiguió una mayor sencillez en cuanto al manejo del prototipo y las pautas del control se reducen a la capacidad de regulación que posee un condensador específico para cada carga que se va a conectar al sistema. No obstante el buen funcionamiento del método se consigue trabajando dentro de los rangos establecidos en este proyecto.
- Conectando el valor apropiado de condensador que requiere la carga para compensar sus reactivos, el valor del voltaje se mantiene dentro del rango permitido para el trabajo del generador.
- En el empleo de un generador de inducción aislado de la red y utilizando como sistema de regulación la compensación de reactivos, es necesario el conocimiento y distribución de todas las cargas que va a manejar el sistema generador; con el fin de establecer cuales de ellas necesitan del condensador de compensación y cuales no; además esto sirve para evitar sobrecargas en el sistema y sacarlo de estabilidad.
- Cuando a la carga se le conecta un valor de condensador que supera la capacidad de reactivos consumidos por la misma, la corriente que toma dicho condensador puede ser tan alta que consigue que



la tensión en terminales del generador caiga hasta la región donde no puede autoexcitarse.

- La curva característica del generador de inducción presenta una pequeña zona muerta en su inicio, en ella es donde el no logra su autoexcitación, por tal motivo se debe evitar que la tensión en terminales del generador de inducción llegue hasta este nivel.
- Durante todas las maniobras hechas en el laboratorio, excepto para la conexión con la red, se presentó el problema de variación en la frecuencia del sistema, con sus consecuentes desequilibrios al mismo. Se debe garantizar el valor de frecuencia constante para obtener buenos resultados.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1.] ACUÑA.T, L.C, GIL M, O, "Las reactancias saturables en el control de velocidad de los motores de inducción tipo industrial", Tesis de Ingeniería Eléctrica, Universidad del valle, Cali 1989.
- [2.] ALGHUWAINEM, S.M, "Steady - State Analysis of a self - excited induction generator self-regulated by a shunt saturable reactor", IEEE, 1997.
- [3.] ARIAS R.D, QUINTERO J, "Implementación de un prototipo de regulador de tensión para un generador de inducción Autoexcitado", Tesis de maestría en sistemas de generación de energía eléctrica, Universidad del Valle, Cali 1995.
- [4.] ARIAS, R.D, QUINTERO, J. Y, QUISPE, E.C, "Diseño y construcción de un regulador de tensión para un generador de inducción autoexcitado", XII Congreso Panamericano de Ingeniería Eléctrica, Panamá, octubre 1995.
- [5.] CHAPMAN, S.J, "Máquinas Eléctricas", Editorial McGraw-Hill - México D.F. 1987.
- [6.] GOURISHANKAR, V, "Conversión de energía electromecánica", Editorial Alfaomega - México D.F. 1995.
- [7.] KOSTENKO, M.P. y PIOTROVSKI, "Maquinas Eléctricas" tomo II, Editorial MIR - Moscú 1976.
- [8.] PASTRANA. G, A.J, SATIZÁBAL M, H.A., "Modelo matemático para el estudio de la regulación de tensión del generador de inducción autoexcitado en estado estable", Tesis de Ingeniería Eléctrica, Universidad del Valle, Cali 1989.
- [9.] QUISPE, E.C., "Modelo matemático para el análisis en estado transitorio del generador de inducción autoexcitado", Tesis de maestría en sistemas de generación de energía eléctrica, Universidad del Valle, Cali 1991.
- [10.] RAMÍREZ, R. Y QUISPE, E.C., "Generadores Asíncronos autoexcitados para su aplicación en microcentrales hidroeléctricas", Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y ramas afines, Perú 1986.
- [11.] SHRIDHAR, L., BHIM SINGH, C.S., JHA, B.P. S.S.MURTHY, "Selection of capacitors for the self-regulated short shunt self-excited induction generator", IEEE trans on Energy conversion, Vol 10, No. 1, March 1995, pp 10-15

AUTORES



Ramiro Ortiz Flórez. Ingeniero Electricista y Magíster en Centrales y Subestaciones Eléctricas del Instituto Politécnico de Donetsk (Ucrania). Profesor Asociado de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle. Integrante de la Cátedra de Conversión de Energía. Área de interés: Generación de Energía.
Ce: pamupo@eiee.univalle.edu.co

Alfredo Sánchez Bocanegra. Ingeniero Electricista de la Universidad del Valle.

Diego Alejandro Trejos Pérez. Ingeniero Electricista de la Universidad del Valle.

*Un buen oyente no solo es popular en todas partes
sino que después de un tiempo llega a saber algo.*

JW. Marriott, Sr.
