

## **PARALELEX (SAPPA)**

### **Un Sistema de Puesta en Paralelo de Microcentrales Hidroeléctricas.**

**Ing. Victor Hugo Kurtz**

## **PRESENTACION**

En la revista ELECTROTECNICA, N° 3 edición Mayo-Junio '98, en el artículo Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, de autoría de los Ingenieros Moya y Mollo. En la página 108, los autores indican que en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones. Se ha desarrollado un sistema de puesta en paralelo denominado SAPPA.

Este trabajo, del mismo autor que el SAPPA (Sistema Automático de Puesta en Paralelo de Generadores Asincrónicos accionados por Microturbina)-, trata de un sistema similar al SAPPA, con modificaciones, resultado de la aplicación del sistema en distintos microaprovechamientos hidroeléctricos en Misiones.

## **RESUMEN DEL TRABAJO**

En el presente trabajo se exponen circuitos prácticos probados, para la implementación de un sistema automático de puesta en paralelo, de generadores asincrónicos accionados por microturbinas hidráulicas, a una red de distribución de energía eléctrica de gran potencia.

## **INTRODUCCION**

La generación en paralelo de microcentrales hidráulicas entre sí, o con otras fuentes energéticas, constituye una solución a muy bajo costo para afrontar la creciente demanda de energía eléctrica del mundo actual, respetando los principios de ecología.

## **DESARROLLO**

### **1 GENERACION EN PARALELO**

Generación en paralelo, se entiende como; la del funcionamiento interconectado, de una unidad generadora de energía eléctrica, con otra que puede ser de igual o mayor potencia que la primera.

### **2 ENTRADA AUTOMÁTICA EN PARALELO**

El sistema automático de puesta en paralelo de generadores asincrónicos (abreviadamente "PARALELEX"), presentado en esta oportunidad, no efectúa tan solo el acoplamiento en paralelo del grupo turbina-generador; si no que también en forma automática, desacopla de la red al generador en caso de falta de energía en la red principal, falta de agua, sobrevelocidad, entre otros.

El funcionamiento del sistema "PARALELEX", puede dividirse en dos operaciones:

a) **Acople en paralelo.**

b) **Desacople del paralelo**, que a su vez se puede dividir en:

1. **Desacople permanente:** Esta operación desacoplar del paralelo al generador y permanece en ese estado hasta que se efectúe un "RESET" (a cargo de un operario).
2. **Desacople transitorio:** Desconecta el sistema de la red, y permanece en ese estado mientras perdure la anomalía retornando luego al punto a).

### 3 DESCRIPCION DEL EQUIPO AUTOMÁTICO "PARALELEX"

El equipo "PARALELEX", está formado por los siguientes módulos (ver fig.1):

- Módulo **monitor de tensión.**
- Módulo **sensor de corriente.**
- Módulo de **velocidad.**
- Módulo de **comando.**

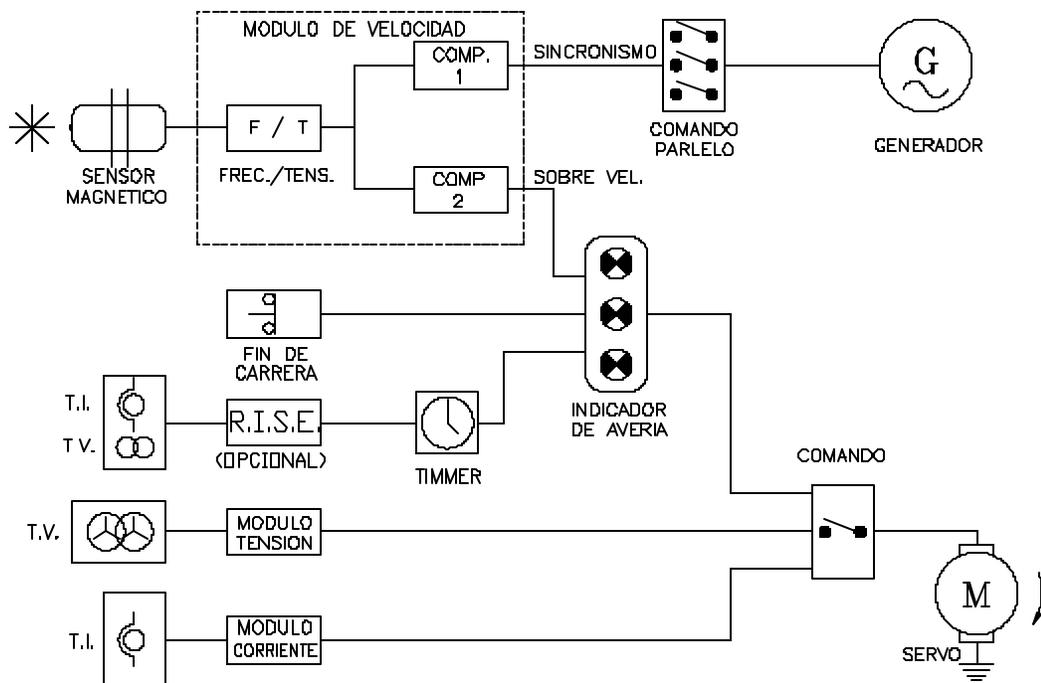


Fig.1

#### 3.1 Funcionamiento del "PARALELEX"

##### 3.1.1 Acoplamiento en paralelo:

1. **El módulo monitor de tensión:** Se encarga de verificar, que la línea se encuentre en condiciones normales de tensión, en caso afirmativo, energizar el servomotor para que accione a su vez el alabe de la turbina, permitiendo fluir el agua que pondrá en movimiento al grupo turbina-generator.
2. Cuando se alcanza la velocidad nominal o próxima a esta, el **módulo de velocidad**, conecta el generador como motor a la línea.
3. Al llegar a la corriente, correspondiente a la energía que se pretende generar, el **módulo sensor de corriente**, interrumpe la acción del alabe regulador.

### **3.1.2 Desacoplamiento del paralelo:**

El desacoplamiento del paralelo, ya sea transitorio o permanente, puede producirse por las siguientes causas:

1. Por falta de energía, en una o más fases de la red.
2. Por sobrevelocidad (embalamiento).
3. Fin de carrera de apertura.

La operación de desacople del punto 1 se considera un *desacople transitorio*, ya que una vez que retorna la energía a la red, se inicia nuevamente la maniobra de puesta en paralelo.

Los puntos 2 y 3, son considerados como *desacople permanente*. Por que una vez producida la desconexión permanece en estado (inactivo), mientras que sendos indicadores luminosos denuncian el motivo de salida de servicio del sistema.

El funcionamiento del generador como motor, -en caso de falta de agua a turbinar- - es posible detectar con relé especialmente diseñado al efecto, denominado RISE (Relé Indicador de Sentido de Energía), que será presentado en otra oportunidad.

## **DESCRIPCION DE LOS DISTINTOS MODULOS**

### **4.1 MODULO MONITOR DE TENSION**

#### **4.2 Introducción**

Este bloque tiene la función de detectar la presencia, o ausencia de energía eléctrica en la línea de potencia, a la cual será conectado en paralelo el grupo turbina-generator.

#### **4.3 Funcionamiento**

Tres comparadores controlan con respecto a una referencia, el nivel de tensión en la línea. Si en cualquiera de las fases disminuye por debajo de la referencia, libera el relé de

salida, desacoplando el sistema. Mientras que cuando la tensión es normal en todas las fases, se acciona el relé RL3, de salida.

#### 4.4 Descripción del Circuito

El circuito consta básicamente de tres fuentes de tensión continua, (ver fig.2), proporcionales a las respectivas tensiones de alterna conectadas a su circuito de entrada. Cada tensión de fase una vez reducida y rectificada, es comparada con una referencia de tensión estable, por los tres circuitos operacionales, CI<sub>1</sub>, CI<sub>2</sub> y CI<sub>3</sub> que con los diodos D<sub>7</sub>, D<sub>8</sub> y D<sub>9</sub>; forman una compuerta “OR”, que en condiciones normales no hace conducir a TR<sub>2</sub>, posibilitando así la conducción de TR<sub>1</sub>, que comanda el relevador RL<sub>3</sub>. En caso de subtensión, el transistor TR<sub>2</sub> pasa a la conducción, bloqueando a TR<sub>1</sub> que desactiva RL<sub>3</sub>.

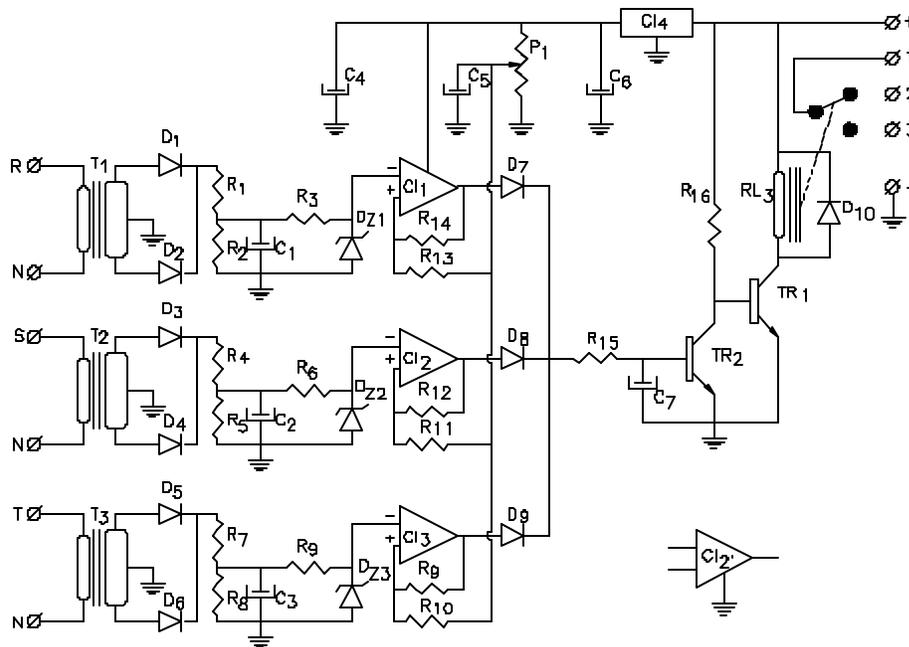


Fig.2

## 5 MODULO SENSOR DE CORRIENTE

Como sensor de corriente, se utiliza el circuito que se muestra en la fig.3. El cual tiene la función, de detectar la corriente en la línea de carga, a los efectos de cesar la apertura del alabe, en el punto que se considera de funcionamiento.

#### 5.1 Descripción del Circuito

Se utiliza un transformador de corriente tipo comercial de X/5A. En cuyo secundario se conecta una resistencia R<sub>1</sub> (ver fig.3) para convertir la corriente secundaria del TI en tensión, que luego de rectificada por el puente formado por los diodos D<sub>1</sub> a D<sub>4</sub>, y C<sub>1</sub>,

se obtiene una tensión continua, proporcional a la corriente que circula por el primario del transformador de intensidad.

La tensión continua así obtenida, es comparada por el circuito operacional  $CI_1$ , con una tensión de referencia, ajustada con  $P_1$ . La tensión de salida del amplificador operacional acciona el relevador  $RL1$ , vía  $T1$ .

## 5.2 Funcionamiento

Cuando  $I_1$  (corriente generada) alcanza el valor prefijado por  $P_1$ , (Punto de operación),  $RL1$  cierra sus contactos y permanece retenido por  $D_6$  (esto último seleccionable dependiendo del aprovechamiento hidroeléctrico).

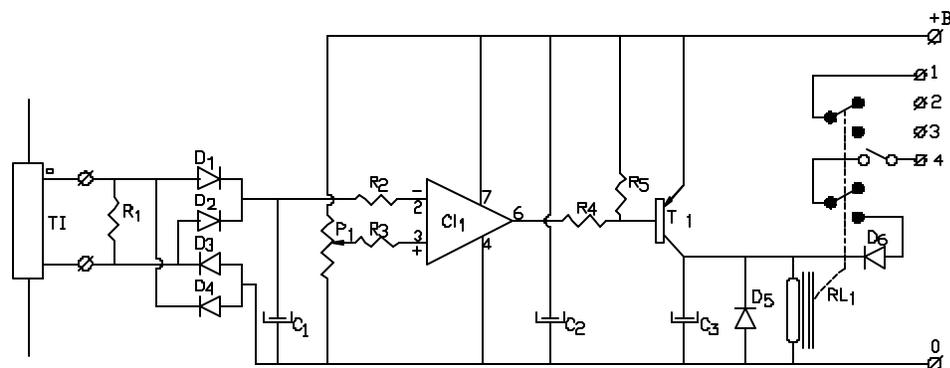


Fig.3

## 6 MODULO DE VELOCIDAD

### 6.1 Introducción

El módulo de velocidad esta formado básicamente por cuatro bloques (ver fig.4).

- **Sensor Magnético.**
- **Convertor Frecuencia-Tensión.**
- **Comparador de velocidad de sincronismo**
- **Comparador de sobrevelocidad**

### 6.2 DESCRIPCION DE LOS DISTINTOS BLOQUES

#### 6.2.1 Sensor Primario de Velocidad

El sensor de velocidad traduce la señal de velocidad (magnitud mecánica), en una magnitud eléctrica, compatible con el resto del sistema.

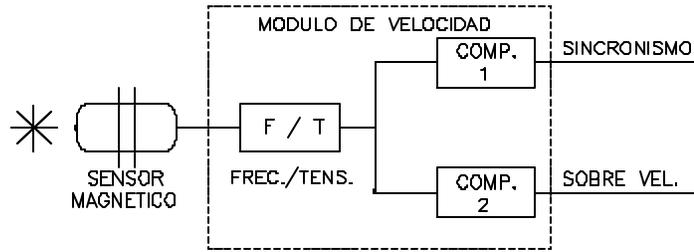


Fig.4

### 6.2.2 Captor Magnético

El sensor magnético, detecta las variaciones de campo magnético, que tienen lugar en las inmediaciones de su terminal captor.

La variación del magnético puede obtenerse por ejemplo:

- De una rueda dentada que se encuentre girando al unísono con el elemento rotor, cuya velocidad se quiere conocer.
- O para el caso concreto de microgeneración hidráulica, de la cabeza de los bulones de sujeción, del manchón de acople entre la turbina y el generador.

### 6.2.3 Ventajas del Captor Magnético

La ventaja del captor magnético, radica en que por el principio de funcionamiento y construcción. Se adecua mas, al tipo de instalación, que en Misiones poseen los microaprovechamientos,

Los captores magnéticos, no requieren prácticamente ningún mantenimiento. Como el caso de los sensores ópticos o mecánicos. Una desventaja de los captores magnéticos , puede ser su costo.

### 6.2.4 La Frecuencia de Salida del Captor Magnético

La frecuencia de salida de los pulsos obtenidos a la salida del sensor magnético, se pueden expresar en función de la velocidad angular sensada, de la siguiente forma:

$$f = \frac{N}{60} Z$$

Donde:

N: Velocidad angular (RPM)

Z: Numero de dientes de la rueda dentada

f: Frecuencia de pulsación de entrada (Hz)

si se utilizan los seis bulones del manchón de acople se tiene que Z = 6, entonces la ecuación se reduce a:

$$f = \frac{N}{10}$$

$f = \frac{N}{10} \text{ (Frecuencia en funcion de velocidad angular)}$
---

### 6.2.5 Conversor de Frecuencia-Tensión:

Dicho conversor se encarga de traducir los pulsos obtenidos a la salida del sensor magnético, en una tensión continua proporcional a la velocidad de rotación del grupo turbina-generator. Este tipo de circuito se experimentó ampliamente para otras aplicaciones también.

### 6.2.6 Principio de Funcionamiento:

El principio de funcionamiento se basa en la generación de pulsos de periodo constante, en cada paso por cero de la tensión de entrada (ver fig.6).

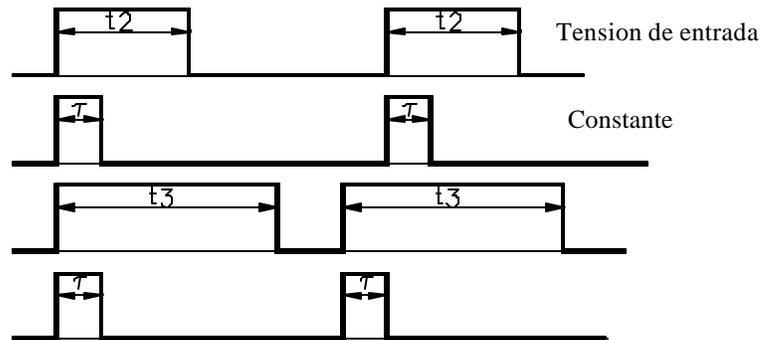


Fig.6

A la salida del circuito se obtienen una tensión continua proporcional a la velocidad o frecuencia de la onda de entrada.

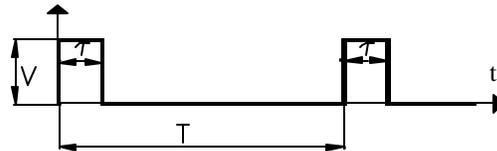
Considerando que el **valor medio** de una función que, dependiente del tiempo, ésta dado por la siguiente ecuación:

$$F = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (1)$$

Donde:

T = Periodo de la función  
f(t) = Función en cuestión

Y la función que nos ocupa tiene la forma:



Entonces la función f(t), tendrá la forma:  $f(t) = V (dt)$

y valdrá:

$$0 < t < \tau ; f(t_1) = V (dt)$$

$$\tau < t < T ; f(t_2) = 0$$

$$0 < t < T ; f(t) = f(t_1) + f(t_2) = V (dt) + C$$

Reemplazando en (1), tendremos:

$$\bar{F} = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{\tau} V(dt) + \int_{\tau}^T 0(dt) \right]$$

como el segundo integrando es cero, la ecuación se reduce a:

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \int_0^{\tau} V(dt) = \frac{\tau \cdot V}{T} \quad (2)$$

$\bar{V}$  = Valor medio de la tension de salida.  
 $\tau$  = Periodo fijo generado por el circuito.  
 $V$  = Tension maxima de salida  
 $T$  = Periodo

Pero  $\tau$  y  $V$  son constantes, por la característica del circuito, por lo que se puede hacer:

$$\tau \cdot V = K \text{ (constante)}$$

Quedando (2) :  $\bar{V} = K \cdot \frac{1}{T}$  y como la frec.  $f = \frac{1}{T}$

nos queda:

$$\bar{V} = K \cdot f$$

Esto indica que la tensión de salida (media) es proporcional a la frecuencia de entrada.

### 6.2.7 Descripción del Circuito

La salida del captor magnético, es del tipo “*open colector*” colector abierto, por lo que cada vez que se produce una perturbación magnética en el cabezal captor, el transistor interno del sensor conduce, produciendo la carga del capacitor C15 (ver fig.7-a), a través de R3 y masa. Disparando el monoestable formado por CI1 y sus componentes anexos. Por un tiempo T dado por, P1, R4 y C1, obteniéndose, así a la salida de CI1, una sucesión de pulsos proporcionales a la frecuencia de entrada.

La red formada por R5, R6, R7, C3, C4, C5, se encarga de convertir los pulsos cuadrados (rectangulares) de salida en una tensión continua prácticamente sin ondulación (ripple).

La componente de alterna “ripple”, a la salida del conversor, es función de la magnitud de la carga conectada a la salida de la red integradora (según se ve en los gráficos adjuntos), para minimizar este efecto se utiliza un circuito operacional CI2, en configuración seguidor de tensión, a continuación de la red..

### 6.2.8 Ensayo del Conversor Frecuencia-Tensión

Para distintos estados de carga, sin el circuito seguidor de tensión.

Frecuencia (Hz)	Salida (V) para Rc= 100 KΩ	Salida (V) para Rc= 1 MΩ
40	1,350	2,58
50	1,665	3,15
60	1,983	3,67
70	2,330	4,37
80	2,615	4,89
90	2,883	5,42
100	3,152	5,91

### 6.2.9 Comparadores

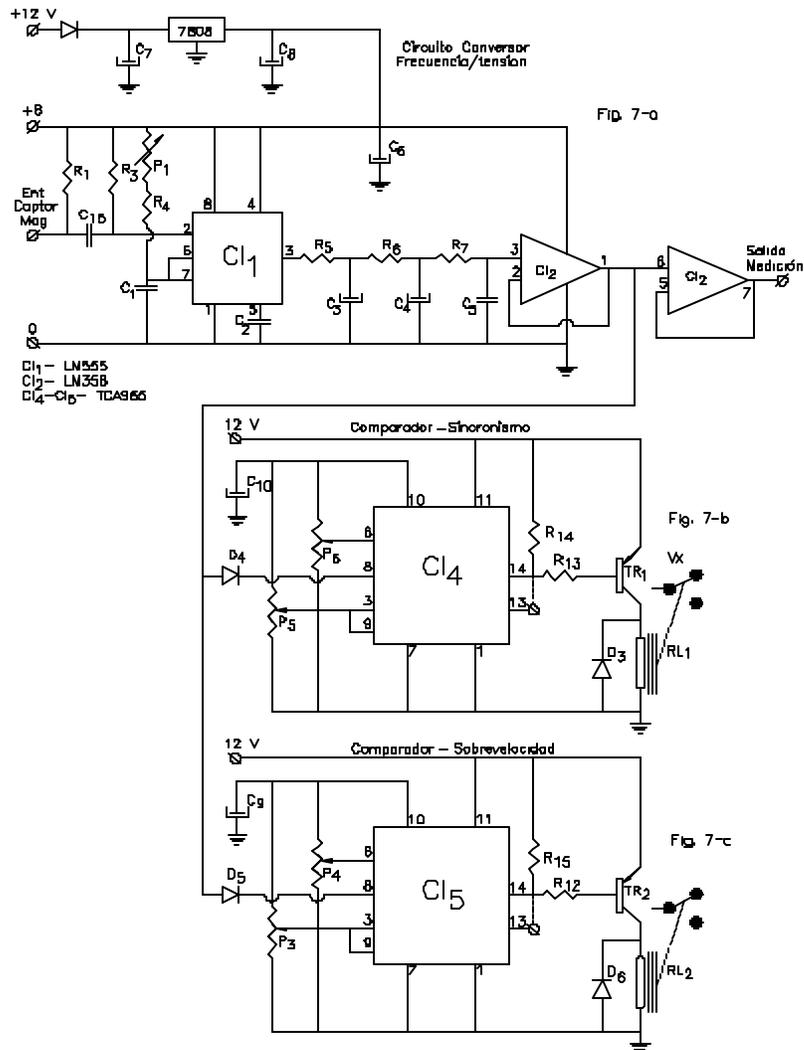
Las etapas comparadoras de velocidad de sincronismo (ver fig.7-b) y de sobrevelocidad (ver fig.7-a), están formadas por dos circuitos integrados CI4 y CI3 (TCA965) comparadores de ventana en configuración de disparador Schmitt, con histéresis y nivel de comparación regulables independientemente uno de otro.

Este integrado posee en su interior una fuente de tensión estabilizada que se usa como referencia.

A la salida del comparador de velocidad de sincronismo, se conecta el relé encargado de efectuar la maniobra de puesta en paralelo, -vía el contactor de potencia (comando)-.

Al terminal de salida del comparador de sobrevelocidad, se puede conectar un relé auxiliar con retención o un rectificador de silicio controlado (RSC) que envíe al cierre el alabe de la turbina.

#### CIRCUITOS DETECTORES DE SOBREVELOCIDAD



## 7.0 MODULO DE COMANDO

### 7.1 Diagramas Funcionales

#### 7.1.1 Contactor de puesta en paralelo

Al llegar a la velocidad de sincronismo se cierra el contacto V1 (ver Fig.18). Si hay energía en las tres fases de la línea de gran potencia, T1 se encuentra cerrado por lo que permite llegar tensión a la bobina del contactor P, el cual permanece retenido por el contacto auxiliar P1.

El contactor P (del paralelo), permanece activado hasta que T1 se libre por falta de tensión o se oprima el botón de parada (Fig. 18).

#### 7.1.2 Circuito de potencia del servomotor:

Acciona en uno u otro sentido el servomotor de corriente continua que abre o cierra el alabe regulador de la turbina, indicando la maniobra los diodos luminosos (LED) LD<sub>5</sub> y LD<sub>6</sub> (ver Fig.19).

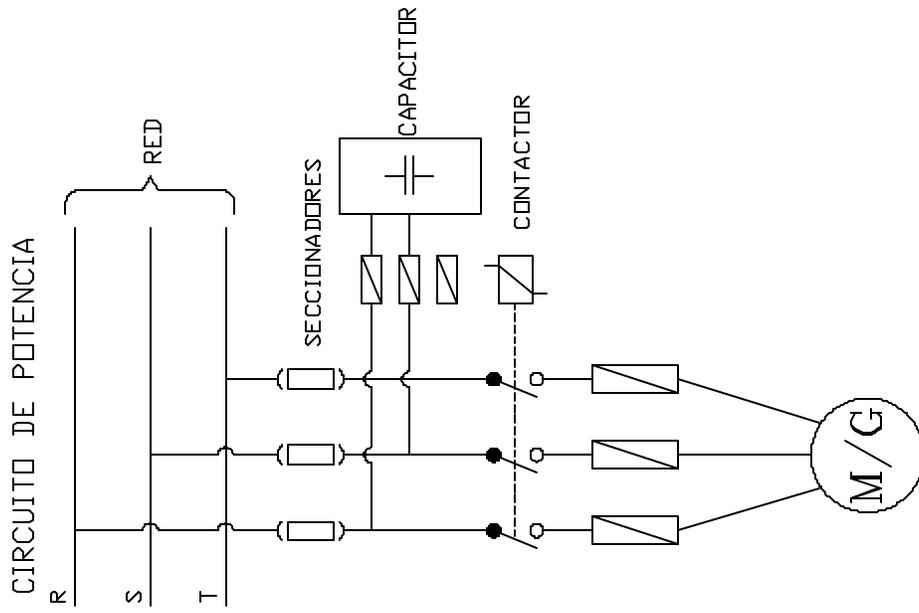


Fig. 17

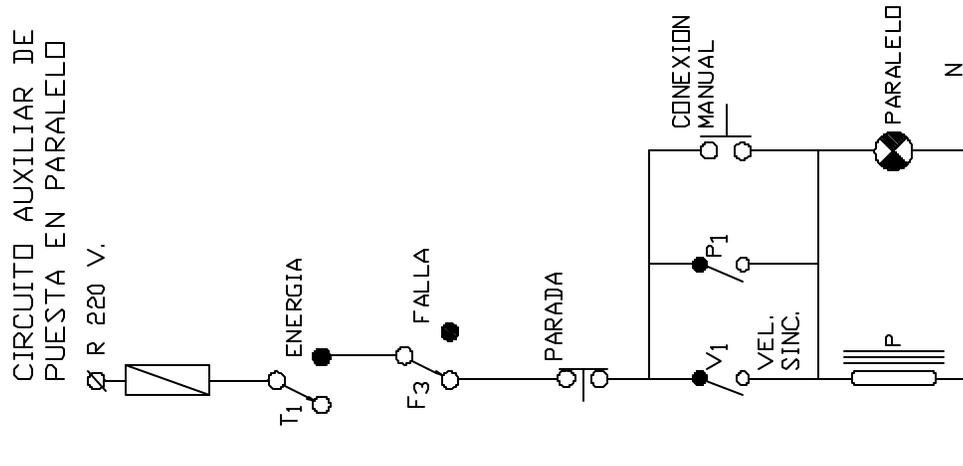


Fig. 18

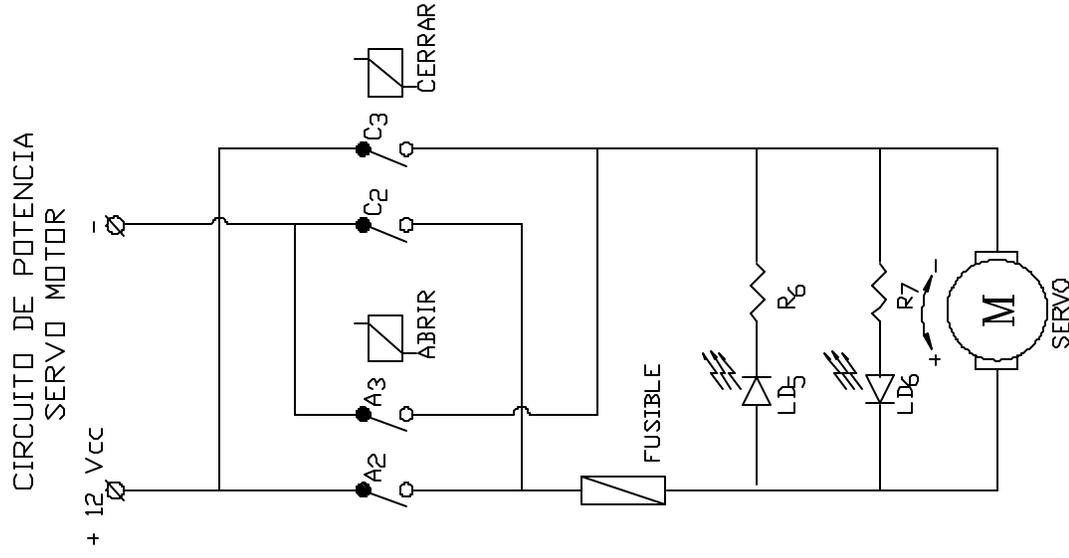


Fig. 19

## 8.0 DIAGRAMA FUNCIONAL DE COMANDO

### 8.1 Sistema Automático

#### 8.1.1 Operación de apertura

Cuando retorna la energía eléctrica luego de un eventual corte, se acciona T2 (ver Fig.20), enviando tensión continua al contacto I1 y al temporizador TM1, que retarda la actuación del “RISE”. El contacto I1 se encuentra en reposo ya que el sistema no llegó aún a la corriente de trabajo. También F1 se encuentra en reposo ya que no hay anomalía de funcionamiento. Cuando se dan las condiciones anteriores opera el relé de comando de apertura del alabe.

La operación de apertura culmina cuando se llega al valor consigna de la corriente generada o por el accionamiento del switch de final de carrera de apertura (SFCA).

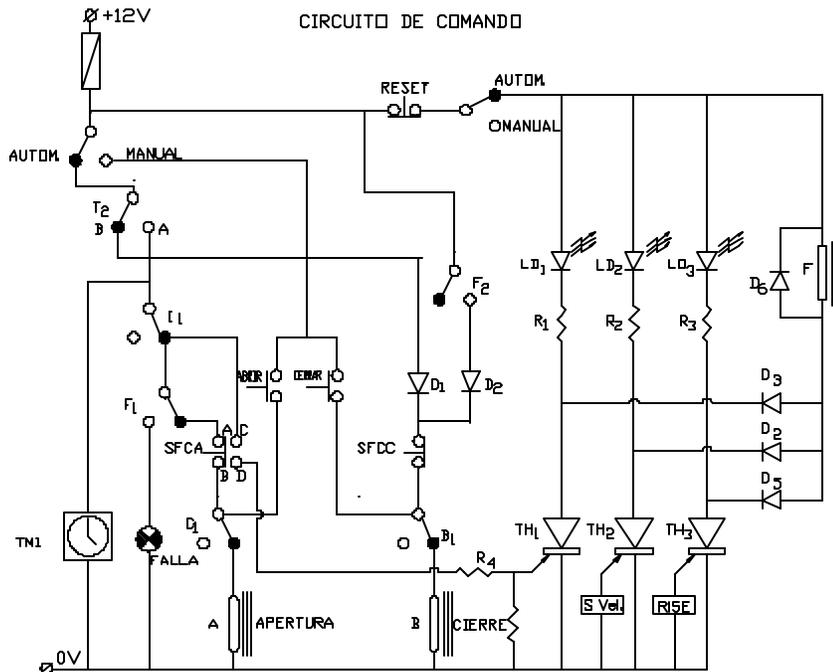
#### 8.1.2 Operación de Cierre

El cierre se puede dar por las siguientes condiciones:

- a) Falta de una o más fases de la línea principal  
El contacto T2 pasa a la posición B que acciona vía D1 el relé de cierre del alabe regulador.
- b) Sobrevelocidad:  
Se dispara el tiristor TH2 (ver Fig.20) que energiza el relé “F” e ilumina LD2, interrumpiendo las posibles maniobras del relé “A” de apertura (vía el contacto F1), a la vez se acciona F2, que envía al cierre el alabe regulador, finalmente, por el contacto F3 se libera el contactor “P” y retira el sistema del paralelo (ver Fig.18).
- c) Accionamiento del contacto de final de carrera de apertura, sin haber llegado a la corriente de consigna:  
Por el contacto C-D del switch final de carrera de apertura (SFCA) se dispara el tiristor TH1 que sigue el mismo procedimiento que en los puntos b y c.  
Los cierres que se efectúan según los puntos b), c) y d), son permanentes, no así el cierre por a).
- d) Cambio en el sentido de la energía:  
Se dispara el tiristor TH3 que ilumina LD3 y acciona el relé “F” y envía al cierre el sistema.

#### 8.1.3 Enclavamiento

Las operaciones de cierre y apertura se encuentran enclavadas para no permitir el accionamiento simultáneo de los dos relevadores y evitar así un cortocircuito en la línea de alimentación del servomotor.



I: Relé Monitor de Corriente  
T: Relé Monitor de Tensión  
F: Relé de Anomalía  
SFCA: Switch Final de Carrera de Apertura  
SFCC: Switch Final de Carrera de Cierre.

Fig.20

## 9.0 CONSIDERACIONES FINALES

### 14.1 Punto de Funcionamiento del grupo turbina-generator

Una vez concluida la operación de puesta en paralelo, la máquina deberá entregar a la red, una cantidad de energía proporcional al caudal turbinado.

Dado que el caudal no es constante todo el año, se tendrán distintos puntos de funcionamiento para distintas épocas del año.

### 9.2 Punto de Trabajo

Como no siempre se posee los suficientes datos hidraulicos, de las cuencas que integran el aprovechamiento, es menester buscar otro método de ubicación del punto de trabajo.

### 9.3 Método Práctico

El método práctico propuesto es el siguiente: Que la máquina funcione siempre a la potencia nominal (por lo tanto a la corriente nominal), no importando la época del año. En época de estiaje la máquina turbinará el caudal módulo hasta que se agote el fluido de reserva en el embalse.

Como en el sistema del "PARALELEX" es posible regular automáticamente el punto de trabajo, a medida que el caudal disminuye el sistema "PARALELEX" trata de mantener

la corriente nominal de consigna, por consiguiente cuanto menor sea el caudal mayor será la apertura del alabe regulador.

En estas condiciones se llegará a un punto en el que el alabe regulador accione el contacto de FINAL DE CARRERA DE APERTURA, produciéndose un cierre permanente.

### 9.3.1 Resumiendo

Con el "PARALELEX" en acción. En épocas de estiaje, se turbinará el volumen del caudal del embalse. Una vez concluida la reserva de agua, el sistema sale del paralelo y los usuarios pasan a consumir energía de la red principal, mientras que se almacena agua en la presa para una nueva generación.

### 9.4 Corrimiento del Punto de Trabajo

Según lo expresado anteriormente, se tendrían períodos generados y períodos no generados, estos últimos mayores.

Para evitar cortes frecuentes, es posible correr el punto de trabajo de la máquina, esto es: suponer un nuevo límite de corriente generada que puede ser, por ejemplo  $\frac{3}{4}$  de la corriente nominal, en estas condiciones se podría generar más tiempo pero menos energía horaria.

#### 9.4.1 Resumen

Se elige el punto de trabajo (porcentaje de la corriente nominal), en función de la época del año, y se hace trabajar la máquina a esa nueva corriente nominal.

Cuando los desacoples sean muy frecuentes se corre el punto de trabajo más abajo.

### 9.5 Punto de Trabajo

La potencia entregada por el grupo Turbina-Generador se puede expresar como:

$$P = K_1 UI$$

U: Tensión generada.

I: Corriente generada.

$K_1$ : Constante.

La potencia que entrega la máquina hidráulica en función del caudal tiene una ecuación del tipo:

$$P = RQH$$

R: Constante de proporcionalidad.

Q: Caudal turbinado.

H: Desnivel (altura).

Igualando ambas expresiones se tiene:

$$K_1 UI = RQH$$

**Agrupando**

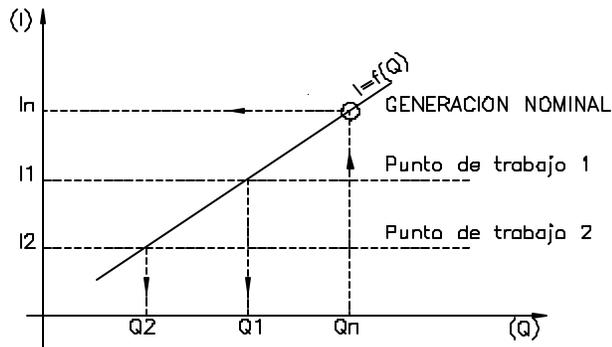
$$I = \frac{RH}{UK_1} Q$$

Como la altura se puede considerar como una constante y suponiendo que la tensión también permanece constante, es posible encerrar el término  $\frac{RH}{UK_1}$  en una nueva constante **K**, quedando

$$I = KQ$$

Donde la corriente generada es directamente proporcional al caudal turbinado.

Representando la función  $I=f(Q)$  se tiene:



En el gráfico se aprecia, que para puntos de trabajo menores que la nominal se tienen con menores caudales turbinados.

El sistema "PARALELEX", tiende a mantener el punto de trabajo sobre la curva  $I=f(Q)$ . En la gráfica se observa otros posibles puntos de trabajo. En la práctica se elige el punto de trabajo de generación nominal algo menor que el que se tendría para la máxima apertura del alabe regulador de la turbina.

## 10 Conclusiones Finales

El sistema presentado en esta oportunidad, no es el único que se puede implementar para la puesta en paralelo, ya que con el avance tan vertiginoso de la electrónica, es posible utilizar equipamiento más sofisticado.

Sin embargo para las condiciones adversas de funcionamiento como las presentadas en plena selva misionera, el sistema funciona a satisfacción hace más de nueve años.

### 11.0 BIBLIOGRAFIA

- MICROTURBINA EN MISIONES- E. Barney - FIO - UNaM.
- GENERACION ASINCRONICA- H. Muñoz - A. Gonzalez - FIO - UNaM.
- PAUTAS PARA GENERACION EN PARALELO CON GENERADORES ASINCRONICOS - Victor H. Kurtz - FIO - UNaM.
- PARALELOS - P. Santander - Victor H. Kurtz - FIO - UNaM.

- PARALELO DE GENERADORES ASINCRONICOS - J. Bycovich. Rev. Tec. e Industria (Bs. As.).
- REVISTA TECNICA MEGAVATIOS N° 62 - Bs. As.
- INFORME C.E.D.E. 1982.
- MAQUINAS MOTRICES, GENERADORES DE ENERGIA ELECTRICA - CEAC.
- MANUAL TTL DATABOOK - Vol.2 - 1985 - Texas Inst.
- Manual Cmos - National - (Ed. Arg.).
- CMOS "INTEGRATED CIRCUITS" - RCA.
- Linear "DATABOOK" - National.
- ELECTRONICS LOAD CONTROL FOR MICRO HYDROPOWER PLANTS - Meir - Detti - SKAT -  
St. Gallen - Zwitterland.