

Alternativas para La Regulación Automática de La Generación En Pequeñas Centrales Hidroeléctricas.

V.H. Kurtz^{a,*}, J.A. Olsson^b, S.R. Santa Clara^c

^{a,b,c} Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

^{a,b,c} Proyecto de Investigación: 16/1120-PI

e-mails: ^a kurtzvh@fio.unam.edu.ar (kurtz.unam@gmail.com), ^b jorgealbertoolsson@fio.unam.edu.ar (jorgealbertoolsson@gmail.com), ^c silviasantaclara@gmail.com

Resumen

En este trabajo se exponen distintas alternativas para la regulación automática de la generación en Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH), funcionando en forma autónoma y aislada de la red eléctrica comercial.

En primer término, se presenta una clasificación de las PCH conforme al tipo de generación, a la forma de conexión con la red eléctrica comercial y al método de operación, para luego poder tratar en cada caso particular, el o los reguladores correspondientes.

Se exponen equipos y sistemas diseñados e implementados por el autor y su grupo de colaboradores desde 1984, en la Provincia de Misiones, Río Negro y Neuquén,

Se tratan topologías básicas probadas, de reguladores de tensión y frecuencia para PCH de hasta 20 kW, operando a caudal variable o flujo lanzado, con generación sincrónica. De modo que un proyectista novel pueda diseñar reguladores para PCH con elementos modernos, por ej. Con electrónica embebida.

Todo atento a que la mayoría de las máquinas hidráulicas utilizadas en PCH son ensambladas artesanalmente en talleres locales y no siempre con procedimientos normalizados, lo que implica que los reguladores tienen que ser construido ad hoc para cada aprovechamiento.

Palabras Clave – Microhídros. PCH. Regulación. Energía Renovable. Control, Generación Sincrónica y Asincrónica.

1. Introducción

El control de la generación en pequeñas centrales hidráulica (PCH) no es tarea simple. Los problemas presentados en el control de la generación eléctrica en pequeños aprovechamientos son similares a los presentados en instalaciones de mayor porte. Sin embargo, el presupuesto disponible en PCH es mucho menor, por lo que no es posible utilizar las soluciones adoptadas para grandes centrales hidroeléctricas en pequeñas centrales.

Como ejemplo: Un motor de 10 kW representa más que el 50% de la carga nominal, en un aprovechamiento de 20 kW. Mientras que el mismo motor representa solo el 1%, para un sistema de 1000 kW.

*Autor en correspondencia.

Soluciones que hace unos años no eran económicamente convenientes, hoy vuelven a ser convenientes, dada la particular situación económica que vive el país.

2. Clasificación de los PAH desde el Punto de Vista de la Generación

En lo que respecta al sistema y/o equipamiento de regulación en PCH existen distintas soluciones, según la característica de operación de cada microcentral [1].

2.1. Clasificación Conforme al Tipo de Generación

La energía hidráulica disponible en forma mecánica en el eje de una turbina es posible transformar en energía eléctrica alterna, por medio de generadores del tipo: Sincrónicos o Asincrónicos. Estos pueden ser trifásicos o monofásicos. Mientras que para generar en corriente continua se utilizan Dínamos o Alternadores del tipo automotriz.

a) **Generación Sincrónica:** La generación sincrónica, ampliamente estudiada y difundida, requiere de equipamiento especial y sofisticado para su funcionamiento y control, más aún en centrales que trabajen en paralelo y sin personal permanente.

b) **Generación Asincrónica:** Los generadores asincrónicos, también conocido como generador de inducción, comúnmente utilizado en micro aprovechamientos hidroeléctricos, son normalmente motores eléctricos de inducción con rotor en cortocircuito o “jaula de ardilla”, del tipo comercial estándar. La generación se produce accionando "el motor" a velocidad de hipersincronismo (velocidad superior a la de sincronismo) y excitando el estator con una determinada tensión.

c) **Generación en Corriente Continua:** Los generadores de corriente continua permiten el almacenamiento directo de la energía producida en acumuladores tipo batería. Generalmente se utilizan alternadores tipo automotriz.

2.2. Clasificación Conforme a la Conexión

Conforme a la conexión eléctrica los sistemas de microgeneración hidráulicas se pueden clasificar en: *aislados o independientes, e interconectados o en paralelo.*

a) **Centrales Aisladas o Independientes:** Las centrales de funcionamiento aislado, son aquellas que poseen todos los elementos necesarios para funcionar sin estar conectada a una red de mayor potencia.

b) **Centrales Interconectadas o En Paralelo:** Se denominan centrales interconectadas a los sistemas de microgeneración que funcionan en paralelo con otro sistema energético de mayor potencia.

2.3. *Clasificación Conforme a la Regulación del Caudal Turbinado*

Conforme a la regulación del caudal turbinado, las PCH pueden clasificarse como:

a) **De Caudal Controlado**: Las PCH que operan a caudal controlado están equipadas con turbomáquina que disponen de órgano regulador de caudal de entrada.

b) **De Flujo Lanzado o Caudal Constante**: En este tipo de central se turbinan todo el caudal disponible -esto es- no tienen control sobre el caudal que entra a la turbina.

3. Regulación en Pequeñas Centrales Hidroeléctricas

3.1. *Calidad del Suministro Eléctrico*

La calidad de suministro eléctrico suele referirse a la forma de onda de tensión de la energía eléctrica en sistemas de corriente alterna. Donde se tiene en cuenta básicamente el valor de la tensión y la frecuencia de la corriente alterna generada.

3.2. *Regulación de la Tensión Generada*

En un sistema de generación hidroeléctrica se debe controlar:

a) *La amplitud de la tensión generada* y b) *La frecuencia de la tensión generada*.

La amplitud de la tensión generada por un alternador sincrónico es función de la velocidad de rotación del generador y de la densidad del flujo del inductor (campo).

También, la potencia que entrega la turbina hidráulica es función de la velocidad de rotación y del caudal turbinado.

Entonces:

- I. Controlando la tensión de excitación se regula el flujo del campo. Por ende, la amplitud de la tensión generada.
- II. Regulando la velocidad de rotación de la turbina se controla el número de vueltas del generador. Por lo tanto, la frecuencia generada.

a) Regulación de Tensión

Para regular la tensión generada hay que controlar la velocidad de rotación y la intensidad del campo eléctrico en el generador.

Los reguladores de tensión utilizados en alternadores sincrónicos se denominan; AVR (*Automatic Voltage Regulator* – Regulador Automático de Voltaje o Tensión). En la actualidad son equipos electrónicos compactos, que generalmente forman parte del generador sincrónico.

Los Reguladores Automáticos de Tensión o AVR (*Automatic Voltage Regulator*) son equipos de línea, generalmente provistos por el fabricante con alternador.

b) Regulación de Frecuencia

En alternadores sincrónicos la frecuencia de la tensión generada es función de la velocidad de rotación del generador. Por lo tanto, es posible utilizar reguladores de velocidad para controlar la frecuencia generada.

La regulación de frecuencia en un sistema hidroeléctrico se realiza variando el caudal turbinado, tomando como señal de muestra la velocidad del eje de la turbina o del generador, o directamente la frecuencia de la tensión generada en bornes del alternador. A este método se suele denominar control de frecuencia por variación de caudal turbinado o FC (*flow control* - control por flujo). (Fig. 1).

La regulación de la velocidad del turbogenerador y por lo tanto de la frecuencia de la tensión eléctrica generada se puede ejecutar con sistemas reguladores; mecánicos, hidráulicos, oleo-hidráulicos, electrónicos o mecatrónicos.

Los reguladores mecánicos, hidráulicos, oleohidráulicos, por su complejidad y costo, no son utilizados en Pequeños Aprovechamientos Hidroeléctricos.

En cambio, los sistemas reguladores electrónicos de frecuencia con accionamiento mecánico del inyector, que se podrían denominarse mecatrónicos, constituyen una interesante solución para la regulación de frecuencia en PCH.

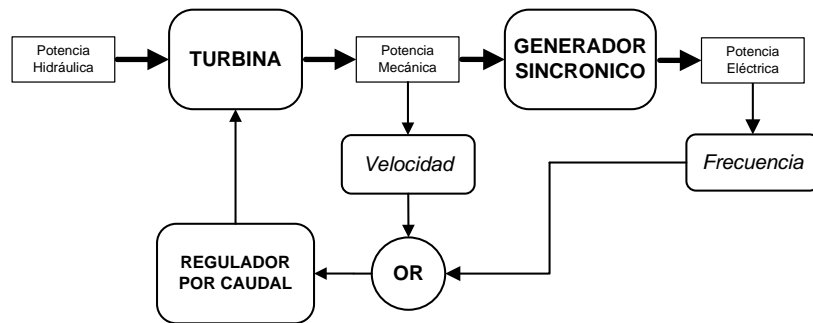


Figura1. Regulación de la frecuencia por control por flujo.
Fuente: elaboración propia

Los reguladores de frecuencia se denominan; AFR (*Automatic Frequency Regulator* – Regulador Automático de Frecuencia).

En las PCH los AFR mecatrónicos, por una cuestión de practicidad, costo y mantenimiento, se toma la señal de muestra para el control de la frecuencia, directamente de la tensión generada, en lugar de la velocidad del eje. (Fig. 2)

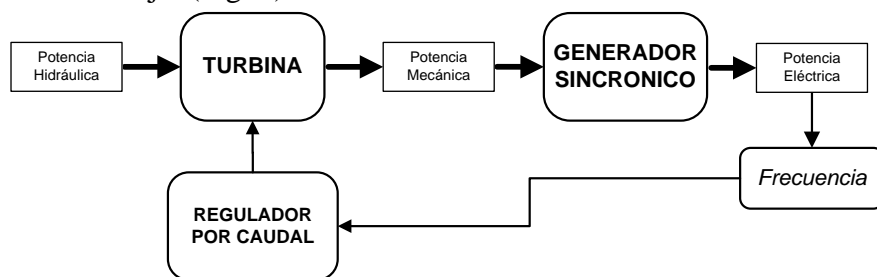


Figura 2. Regulación de la frecuencia por control por flujo, en sistemas mecatrónicos.

Fuente: elaboración propia

4. Reguladores para Generación Sincrónica en Sistemas con Caudal Controlado.

En esta oportunidad se analizarán solamente reguladores electrónicos de frecuencia y tensión, para centrales de funcionamiento aislado o independiente.

4.1. Regulador Electrónico de Frecuencia

Como se indicó anteriormente, los AVR son equipos de línea, generalmente provistos por el fabricante con el alternador. Mientras que el Regulador Automático de Frecuencia es un equipamiento que tiene que ser construido ad hoc, para cada aprovechamiento y no siempre en un producto estándar de mercado.

4.2. Regulador Electrónico de Frecuencia por Variación de Caudal

En el sistema regulador de frecuencia por variación de caudal, un servomecanismo controlado para la frecuencia generada actúa sobre el órgano regulador de caudal, modificando la cantidad de agua turbinada. (Ver Fig. 2 y 3).

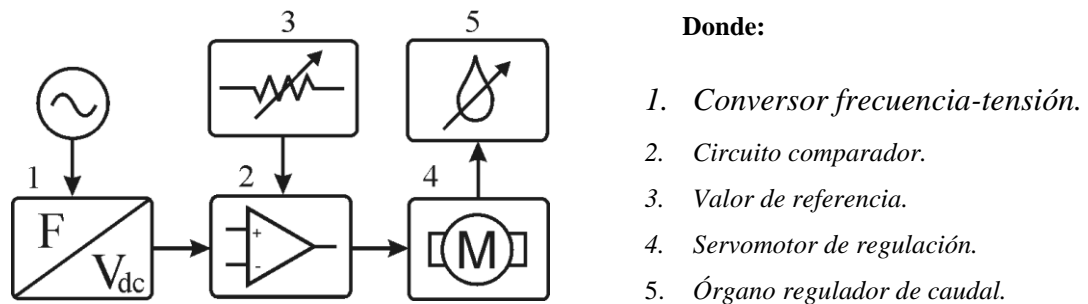


Figura 3. Regulador de frecuencia por variación de caudal

Fuente: elaboración propia

La velocidad máxima de operación del órgano regulador de caudal está limitada por las condiciones hidrodinámicas del aprovechamiento. En PCH suele ser lenta respecto a la variación de la carga demandada. La ventaja de este sistema se encuentra en la posibilidad de almacenar agua.

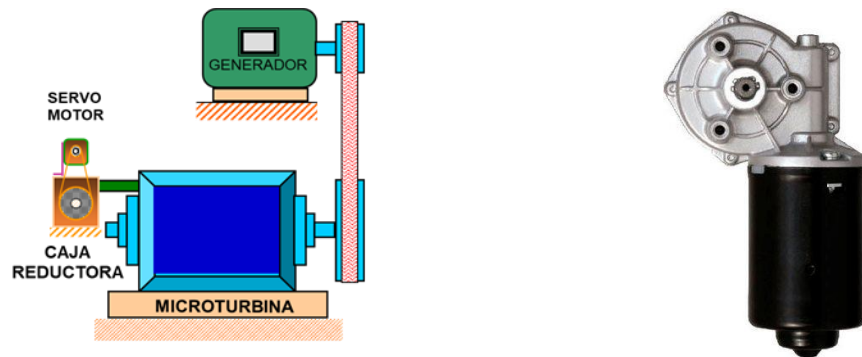


Figura 4. Croquis del grupo turbogenerador e imagen de un tipo de motor de accionamiento utilizado.
Fuente: elaboración propia

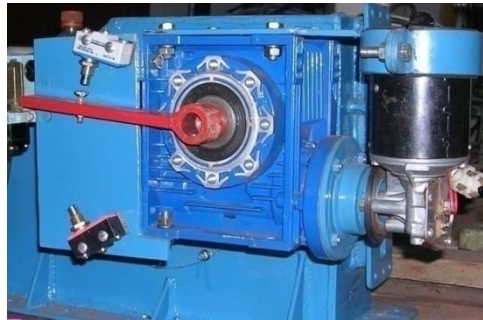


Figura 5. A la izquierda de la imagen, se puede observar el servomotor acoplado a la turbina.
Fuente: elaboración propia

Para el accionamiento del órgano regulador (álabe regulador en turbinas tipo Michell-Banki), en los aprovechamientos implementados en la provincia de Misiones, se utilizó y se siguen utilizando, motores de corriente continua de imanes permanente -tipo limpia parabrisas de automóviles- como servomotor (Fig. 4 y 5). No obstante, se están estudiando otras alternativas.

En la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones (FIO-UNaM), se estudiaron e implementaron distintas topologías de la etapa de potencia, destinadas al comando de los servomotores de accionamiento del alabe regulador de caudal.

4.2.1 AFR por Variación de Caudal, Según la Fuente de Alimentación.

Se pueden diferenciar al menos tres formas de alimentar un sistema de control de frecuencia por variación de caudal turbinado.

- a) Sin acumulador en la casa de máquinas.
- b) Con doble acumulador en la casa de máquinas.
- c) Con un acumulador en la casa de máquinas.

a) Sin Acumulador en la Casa de Máquinas.

Se trata de reguladores que operan con tensión generada por la propia PCH, sin la utilización de un acumulador en la casa de máquina.

En estos casos el inicio de la generación se hace en forma manual o por telecomando desde la casa del usuario [2].

En la fig. 6 se ilustra un sistema de alimentación del servomotor regulador de caudal utilizando rectificación controlada de onda completa y transformador con punto medio. El sentido de giro del motor se impone accionando dos de los cuatro RCS (Rectificador de Silicio Controlado), también conocidos como tiristores unidireccionales o simplemente tiristores.

Con esta configuración es posible implementar un sistema de control proporcional (variando en ángulo de conducción), o un control del tipo *todo o nada*. En este último caso disparando dos de los RCS en el cruce por cero.

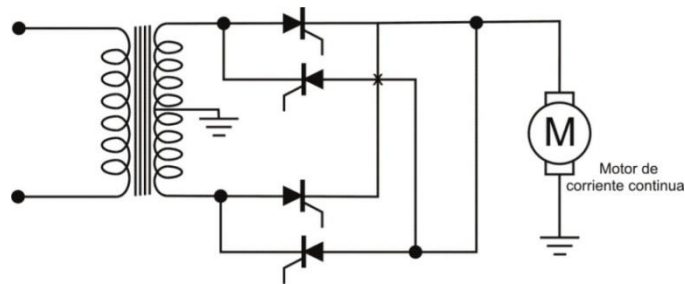


Figura 6. Alimentación del servomotor con tiristores del tipo RCS.
Fuente: elaboración propia

En la figura 7 se muestra el esquema de la etapa de potencia para un sistema alimentado por fuente partida, utilizando relés (relevadores electromecánicos).

Esta configuración permite el uso de relés de un solo contacto NA (normalmente abierto), comunes en la industria automotriz.

Nota: A los relés o relevadores electromecánicos tipo automotriz, en el comercio de autopartes, se los conoce como "relay".

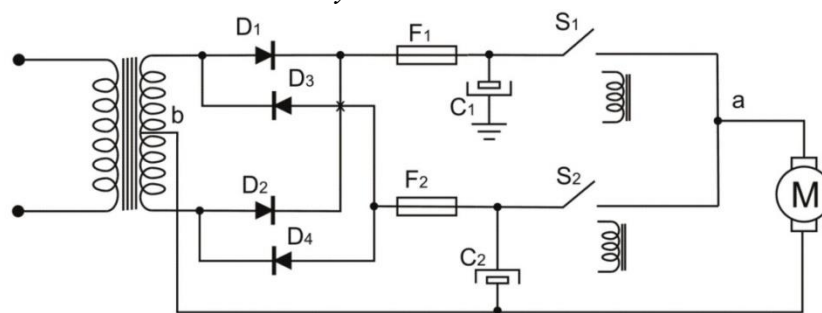


Figura 7. Comando de motor con relés electromecánicos.
Fuente: elaboración propia

b) Con Doble Acumulador en la Casa de Máquinas.

En este caso se utiliza para accionar el servo motor regulador de caudal una fuente simétrica o partida, conformada por dos acumuladores de igual tensión ubicada en la sala de máquinas.

Para PCH, de funcionamiento aislado y autónomo, se hace indispensable el uso de un acumulador en la casa de máquina, para comandar el arranque y parada de la central, registro de datos, transmisión de información, etc. Esta batería puede ser doble, lo que de alguna manera simplifica la etapa de potencia.

En la fig. 8 se puede observar la disposición básica de la etapa de potencia con fuente partida. Al accionar uno u otro interruptor se consigue el giro del motor en uno u otro sentido.

Estos interruptores pueden ser de estado sólido (semiconductores), o electromecánicos, relés. En este caso solo es posible implementar un control del tipo *todo o nada*.

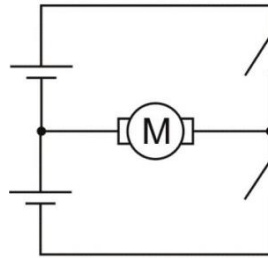


Figura 8. Esquema básico, con fuente simétrica.

Fuente: elaboración propia

Si los interruptores indicados en el esquema de la fig. 8 son de estado sólidos es posible implementar un sistema de control proporcional, o un control del tipo *todo o nada*.

En la fig. 9 se presenta una configuración con dos transistores complementario tipo BJT (*Bipolar Junction Transistor* - Transistor de juntura bipolar).

Mientras que en la fig. 10 se expone la topología de la etapa de potencia, utilizando transistores unipolares complementarios tipo MOS-FET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* - Transistor Semiconductor de Oxido Metálico por Efecto de Campo)

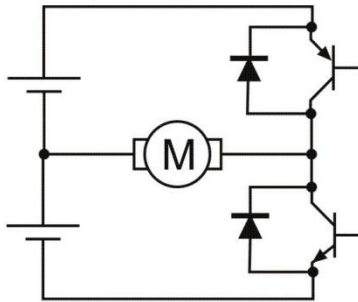


Figura 9. Comando de potencia con utilizando transistores BJT.

Fuente: elaboración propia

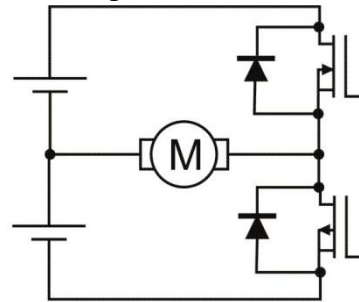


Figura 10. Comando de potencia con utilizando transistores MOS-FET.

Fuente: elaboración propia

c) Con un Acumulador en la Casa de Máquinas.

Se trata de PCH, donde el servomotor de comando es alimentado por una única batería, generalmente de 12V, ubicada en la casa de máquinas. Esta opción es la más utilizada actualmente.

En sistemas con batería única se suele utilizar la configuración conocida como puente “**H**”. El puente **H** puede estar conformado por cuatro llaves electromecánica (relés) fig. 11, cuatro llaves de estado sólido o una combinación de ambos (configuración híbrida –calificación de los autores-) como se puede apreciar en la figura 13. Tal como se indica anteriormente solo es posible utilizar un sistema de control proporcional, en los casos ilustrados en la fig. 12 y 13.

En los puentes **H** conformado por cuatro llaves electromecánica (relés) solo es posible hacer operar el servomotor en configuración *todo o nada*. En la fig. 11 están representados los contactos de los relevadores y de los interruptores de final de carrera FCC (final de carrera de cierre) y FCA (final de carrera de apertura).

Al cerrar solamente los contactos K1.1 y K1.2 el motor gira en un sentido, por ejemplo abriendo el alabe regulador. Mientras que al cerrarse solamente K2.1 y K2.2 el motor gira en sentido contrario, cerrando el álabe regulador.

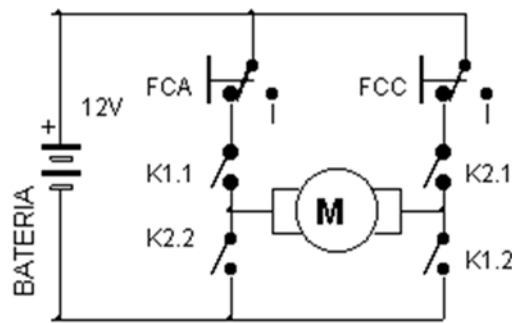


Figura 11. Puente **H** conformado por cuatro llaves electromecánica (relés).

Fuente: elaboración propia

El puente **H full**, de la fig. 12 utiliza dos transistores MOSFET complementarios por columna. Con esta configuración es posible implementar un control proporcional y un mejor control sobre los tiempos de encendido y apagado de las llaves electrónica.

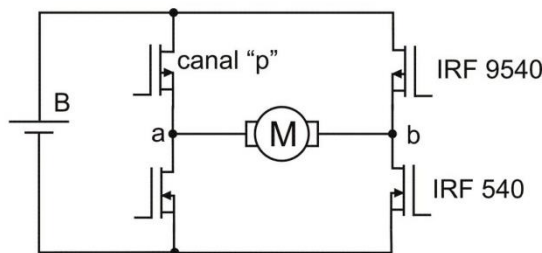


Figura 12. Etapa de potencia en puente **H** completo, con MOSFET de canal **P** y **N**.

Fuente: elaboración propia

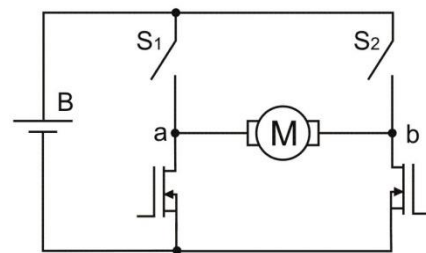


Figura 13. Etapa de potencia en puente **H** híbrido

Fuente: elaboración propia

El sistema híbrido (fig. 13) (llaves electromecánicas combinada con transistores) tiene la ventaja, además de poder trabajar en forma proporcional o *todo o nada*, que se ahorra dos transistores, muchas veces más caros y sensible a las sobre carga que su equivalente electromecánico. Por otro lado, los transistores MOSFET reemplazados, de canal **P**, son generalmente más caros que su par **N** y difíciles de conseguir. Además, el disparo de los semiconductores unipolares ubicados en la parte superior de un puente **H**, necesitan circuitos más elaborados. Para una información más detallada de sistema el lector puede recurrir a los trabajos [2] y [3].

En la fig. 14 se ilustra una alternativa a la configuración en puente **H** para relé electromecánico. En este caso es posible utilizar un relé NA (normalmente abierto) **K1** y dos relés inversores **K2.1** y **K2.2**. Los contactos **K2.1** y **K2.2** gestionan el sentido de giro del motor, mientras que **K1** el comando de accionamiento. Para más detalle ver [2].

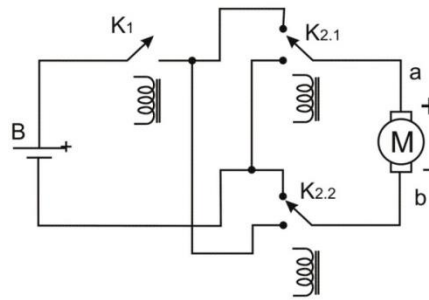


Figura 14. Comando con relevadores electromecánico.
Fuente: elaboración propia

5. Reguladores para Generación Sincrónica en Sistemas que operan a Flujo Lanzado.

Las turbo máquinas que funcionan a flujo lanzado no disponen de órgano regulador de caudal turbinado, por lo tanto no es posible regular la frecuencia de la tensión generada, variador el caudal de entrada a la turbinas.

En PCH equipadas con generadores sincrónicos, el control de la tensión generada se realiza utilizando un sistema AVR, generalmente provisto con el alternador, como se indica en el apartado (4.1). Mientras que el control de la frecuencia generada -al no disponer de órgano regulador de caudal- se realiza por derivación de carga o carga balasto.

5.1. Regulación Electrónica de Frecuencia por Carga Balasto.

El sistema de regulación por control de carga balasto, carga ficticia o en derivación, consiste en mantener invariable la potencia generada. Es decir; la máquina funciona a potencia constante.

$$P_g = P_d + P_c \quad (1)$$

Donde: P_g =Potencia generada, P_d =Potencia disipada en la carga balasto y P_c =Potencia consumida.

La energía no consumida por el usuario se disipa en forma de calor, en una o más resistencias, denominadas comúnmente resistencia balasto (carga lastre, carga fantasma o *dummy load*), ubicadas generalmente en la casa de máquina, como se indica en la fig. 15.

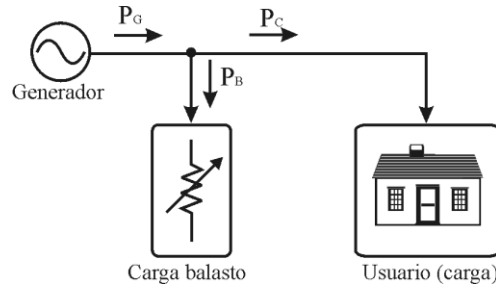


Figura 15. Sistema de regulación por carga balasto.

Fuente: elaboración propia

Diagrama en bloque de los sistemas AFR, por derivación de carga en centrales con generación sincrónica. Fig. 16.

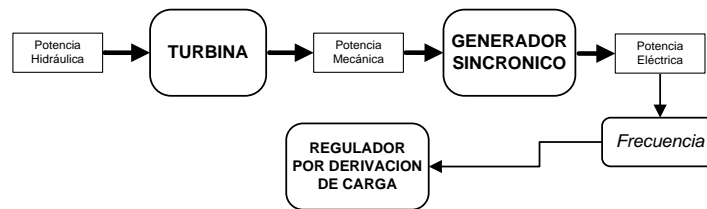


Figura 16. Regulación de frecuencia por carga balasto.

Fuente: elaboración propia

La porción de energía enviada hacia la resistencia balasto es función de la frecuencia de la tensión generada. El sistema de control compara permanentemente la frecuencia generada con un valor de referencia [4].

Si la frecuencia generada es mayor que la de referencia el sistema deriva más energía hacia las resistencias balasto. De la misma manera, si la frecuencia generada es menor que la de referencia el regulador deriva menos energía hacia la resistencia balasto.

Para controlar la energía disipada, en la o las resistencias que forman la carga balasto, es posible utilizar distintas topologías.

A continuación, se listan algunas de las configuraciones estudiadas en la Facultad de Ingeniería de la UNaM, para el control de la energía disipada en la carga balasto. Que serán presentadas en otra oportunidad:

- Control binario combinacional.
- Control por ángulo de fase.

c) *Control por conmutación o troceado de onda (chopper).*

6. Conclusiones

Conforme a lo expuesto, es posible ver que cada caso de generación amerita un sistema regulador particular. Estos reguladores pueden ser similares, en lo que a la etapa de potencia se refiere, pero difieren en la ley de control o el parámetro a controlar.

En los reguladores electrónicos de frecuencia por variación de caudal, el tiempo de respuesta es bastante mayor que en los sistemas de control por carga balasto. La ventaja se encuentra en la posibilidad de economizar agua.

Respecto a los AFR por variación de caudal, según la fuente de alimentación, la alternativa con un acumulador en la casa de máquinas aparece como la más aceptable. Ya que permite disponer de una fuente de energía auxiliar en la sala de máquinas, sin que haya generación. Por ej. Para transmisión de datos, accionamiento a distancia, registro de datos, etc.

En relación a la configuración de la etapa de potencia en AFR por variación de caudal, la configuración con relevadores electromecánicos presentó mejor desempeño en funcionamiento prolongado en zonas alejadas de los centros urbanos, por su robustez y facilidad de reparación, que sus similares electrónicos. Siempre y cuando el control sea *todo o nada*.

De las alternativas para el control por carga balasto estudiadas, si bien los tres métodos son aceptables: En el control por conmutación (troceado - *chopper*) se encontró una solución versátil, relativamente simple y económica.

Queda para una próxima oportunidad, los sistemas de control de generación asincrónica (motores como generador). Tanto para centrales con posibilidad de variación de caudal, como sistemas a flujo lanzado.

Para la regulación en PCH con generación asincrónica a flujo lanzado el problema es mayor, ya que se tiene que controlar la frecuencia y la tensión generada, pero no se dispone de órgano regulador de caudal para controlar la velocidad de rotación de máquina, ni de control de la excitación del alternador por -tratarse de un motor con rotor en cortocircuito-, para el control de la tensión generada.

Varias de las soluciones presentadas en esta oportunidad, se aplican también a la generación asincrónica, pero con distinta ley de control.

7. Referencias

- [1] KURTZ, V. H. (2010). *Energías Renovables: Pequeños Aprovechamientos Hidroeléctricos en Misiones*. Publicación Bicentenario. Planificar el desarrollo. 2010 vol.11 n°1. p27 - 29. ISSN 2250-6748. DNIC - Dirección Nacional de Información Científica. Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva (MinCyT).
- [2] KURTZ, V.H. (2003). *Telemando para Pequeñas Centrales Hidroeléctricas*. Anais do X Encontro Latino-Americano e do Caribe em Pequenos Aproveitamentos hidroenergéticos, X ELPAH. Poços de Caldas – Minas Gerais – R.P. de Brasil.

- [3] ANOCIBAR, H.R. (1997). *Regulador de Tensión y Frecuencia*, Anales del VII Encuentro Latinoamericano en Pequeños Aprovechamientos Hidroenergéticos, VII ELPAH, Cajamarca - Perú.
- [4] KURTZ, V.H. y ANOCIBAR, H.R. (2005) *Sistema Mixto para el Control de la **Generación en Micro Centrales Hidroeléctricas***. **Anales del XI encuentro** latinoamericano en pequeños aprovechamientos hidroenergéticos, XI ELPAH. Valparaíso – Chile.
- [5] SMITH N., (2000) *Uso de Motores como Generadores de Bajo Costo para Micro Hidrogeneración*. Anales del VII encuentro latinoamericano en pequeños aprovechamientos hidroenergéticos, ELPAH, pp. 77–89
- [6] KURTZ, V.H et al (2009) *Control Electrónico de Frecuencia para Alternadores Sincrónicos de Inducción de PCH de Operación Aislada*. XIII Encuentro Latinoamericano y del Caribe Sobre Pequeños Aprovechamientos Hidroenergéticos ELPAH – Cajamarca – Perú.
- [7] KURTZ, V.H.y BOTTERON F. (2005) *Alternativa para el Control de Cargas Balasto*. Anales del XI encuentro latinoamericano en pequeños aprovechamientos hidroenergéticos, XI ELPAH. Valparaíso – Chile.