

REGULACIÓN DE FRECUENCIA EN UNA MINIHIDROELECTRICA POR CARGA LASTRE MEDIANTE UN PC EMBEBIDO

Leonardo Peña Pupo*, Hugo Domínguez Abreu*, Julio Fong Barrio**
Juan Antonio García-Alzórriz Pardo***, Antoni Sudrià Andreu****

**Departamento Informática. Facultad de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Oriente.*

***Departamento de Control Automático. Facultad de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Oriente.*

****Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Barcelona. Consorcio Escuela Industrial de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña.*

*****Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña.*

{leonardo,hdom,jfong@fie.uo.edu.cu}

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño e implantación de un sistema digital de regulación de la frecuencia eléctrica de una minihidroeléctrica operando en modo aislado, por el método de carga lastre. La regulación eficiente de la frecuencia y la tensión eléctricas frente a variaciones de la carga demandada es un problema aun no resuelto en la casi totalidad de las instalaciones hidrogeneradoras de Cuba que trabajan aisladas del Sistema Electroenergético Nacional (SEN). El sistema de regulación se implantó utilizando un PC embebido y una tarjeta de adquisición de datos y fue probado en una unidad hidrogeneradora de 26kW con resultados satisfactorios.

Keywords: Frequency Regulation . regulation by ballast load, mini-hydroelectric automation, digital control based on PC

1. Introducción

En la actualidad tiene especial importancia la explotación de pequeñas centrales hidroeléctricas, micro y minihidroeléctricas, como alternativa de generación de energía eléctrica en zonas rurales montañosas donde no llega una red electroenergética mayor, debido además del posible beneficio económico, a su gran valor social y ecológico. No se descarta incluso, su conexión a sistemas mayores, cuando sea posible y favorable económicamente, como es el caso de las centrales a pie de presa para el aprovechamiento de la energía de las aguas de riego agrícola o empleadas en otros usos.

A partir de finales de la década de los años 1970 es notable el incremento del uso de esta fuente de energía renovable, como parte de la política de desarrollo social y económico que se ha venido aplicando en los últimos años por el Estado, beneficiándose amplias comunidades rurales aisladas del Sistema Eléctrico Nacional. Según [1] Cuba cuenta con 167 micro, mini y pequeñas centrales hidroeléctricas, de las cuales 27 están conectadas al Sistema Electroenergético Nacional (SEN) y 148 funcionan aisladas.

La casi totalidad de estas instalaciones trabajan en modo aislado y son operadas manualmente, con poca o ninguna automatización, lo que no garantiza la debida seguridad y calidad de la energía eléctrica generada. En este sentido, es incuestionable lo beneficioso que resulta la introducción de sistemas de protección y regulación automática de frecuencia y tensión a la salida de estas unidades generadoras.

Motivado por esta problemática, el grupo de Automatización de Fuentes de energía Renovables (AFER) de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, en la Universidad de Oriente, ha realizado una serie de trabajos dirigidos a buscar soluciones a problemas de automatización de minihidroeléctricas, que sean confiables, económicas y que causen el menor daño posible al medio ambiente. Entre los trabajos realizados se destacan los relacionados con el diseño e implantación de sistemas de regulación de unidades hidrogeneradoras

de pequeña potencia operando en modo aislado, que incluyen modelado, identificación y simulación dinámica [2, 3];[3] el diseño, prueba y ajuste de algoritmos de control digital y proyectos de automatización basada en sistemas digitales[4];[3, 5]; [5]; [6].

En este trabajo se presenta el diseño e implantación de un sistema digital de regulación de frecuencia por carga secundaria de una unidad hidrogeneradora de 26 kW, utilizando un PC embebido. Primero se tratan algunos aspectos generales de la regulación de frecuencia por carga de instalaciones minihidroeléctricas en operación aislada, luego se presenta la metodología de diseño empleada y su aplicación en la unidad específica.

2. Regulación de unidades hidrogeneradoras operadas en modo aislado

La regulación de la unidad hidrogeneradora es necesaria en un sistema de potencia aislado para garantizar la continuidad y la calidad de los parámetros fundamentales, frecuencia y tensión, que deben mantenerse dentro de límites estrechos alrededor de valores nominales establecidos. En estos sistemas de pequeña potencia frecuentemente se producen variaciones de caudal y de carga importantes, que afectan la velocidad de rotación del grupo turbina-generador, ya que esta depende del equilibrio entre la potencia hidráulica que entra a la turbina y la potencia eléctrica producida por el generador. Las variaciones de velocidad se traducen en variaciones de la frecuencia la tensión a la salida del generador. Por esta razón es importante la regulación automática de estos parámetros, mediante un sistema con respuesta rápida, confiable y de bajo costo.

Se distinguen tres tipos de regulación de velocidad. Regulación de velocidad por caudal cuando se varía la potencia hidráulica de entrada mediante la variación del caudal de agua suministrada a la turbina. Regulación por carga complementaria, cuando se mantiene la generación de potencia constante manteniendo el caudal constante y se varía una carga secundaria en bancos de resistencia (carga lastre) de manera que la potencia consumida sea igual a la generada. Mediante la combinación del control por caudal y por carga complementaria.

El método de regulación por caudal de agua es, en general, el método más empleado en la regulación de unidades hidroeléctricas. Tiene la ventaja de que el consumo de agua se ajusta al necesario en dependencia de la potencia demandada, lo que permite el ahorro de este recurso sobre todo cuando hay posibilidades de almacenamiento o en los ríos con poco caudal de agua. Tiene como desventaja, en comparación con la regulación por carga, que la respuesta dinámica del sistema de regulación ante una variación instantánea de la carga es más lenta, debido a que el tiempo de respuesta del sistema incluye además del tiempo de aceleración del grupo T_A , debido a la inercia de las masas rotatorias, el tiempo transitorio hidráulico T_H , producto de la inercia

y el rozamiento del flujo de agua.

El tiempo de aceleración del grupo se define como el tiempo requerido para llevar las masas rotatorias desde el reposo hasta las revoluciones nominales.

Los valores de estos tiempos dependen de las dimensiones y parámetros de operación de la unidad y sus valores pueden estimar aproximadamente por fórmulas analíticas[7].

El método de regulación de la frecuencia por carga complementaria tiene la ventaja, en comparación con la regulación por caudal, que la respuesta dinámica del sistema de regulación ante una variación instantánea de la carga es más rápida, toda vez que no interviene en el comportamiento del lazo el tiempo transitorio hidráulico. Esto hace innecesario la utilización de un volante de inercia, el cual es un elemento fundamental cuando se utilizan reguladores para el control sobre el flujo. Pero tiene la gran desventaja del gasto innecesario de agua en la generación de la potencia disipada en la carga complementaria desperdiciando gran parte de la energía generada, por lo que se limita su utilización a instalaciones con suficiente agua disponible siempre y cuando no interese o no sea significativo el exceso de consumo de agua. También hay que tener en cuenta que los bancos de resistencias de carga complementaria resultan más costosos en instalaciones de gran potencia.

El control de la disipación de energía en la carga complementaria se puede lograr de diferentes formas[8], mediante la utilización tiristores o triacs conectados en serie con las resistencias, o mediante la utilización de bancos de resistencias de conexión escalonada.

El método de regulación combinada de la frecuencia por gasto de agua y por carga complementaria, consiste en controlar la frecuencia por carga, de manera rápida manipulando una carga complementaria, limitada a un determinado por ciento de la carga máxima, mientras que de manera más lenta, mediante el caudal de agua se ajusta la potencia de entrada a la turbina en correspondencia con el nivel de potencia demandada al generador. Dada las particularidades de los consumidores, la carga complementaria puede implementarse de modo que represente entre el 20 y 30 % de la potencia nominal del generador. De esta manera se aprovechan las ventajas de ambos métodos, logrando una buena regulación sin demasiado gasto de agua, cuestión de suma importancia en el caso de los ríos de poco caudal, sobre todo en época de sequía, y además garantiza un menor impacto en el medio ambiente al disminuir el gasto excesivo de agua de su curso natural. Este método puede recomendarse para su utilización en las mayorías de las pequeñas instalaciones hidrogeneradoras no conectadas al Sistema Electroenergético Nacional (SEN) de Cuba.

3. Regulación de frecuencia por carga secundaria de una unidad hidrogeneradora.

Se diseñó e implantó un sistema de regulación de frecuencia por carga lastre para la microhidroeléctrica “Arroyo Blanco”, ubicada en el municipio de Baracoa, Provincia Guantánamo, Cuba. Esta unidad hidrogeneradora opera en modo aislado, posee un generador sincrónico trifásico de 26 kW, una turbina Mitchell-Banki de 30 kW, su tensión de línea es de 220 V, la longitud de la tubería de carga es de 60 m con una carga hidrostática de 16 m.

Se plantea como objetivo del sistema de control mantener el valor de la frecuencia a la salida del generador, en un valor cercano al nominal (60 Hz), en condiciones de operación normal, rechazando perturbaciones con un comportamiento del proceso transitorio suave y lo suficientemente rápido.

Teniendo en cuenta las características del tipo de unidad, de los consumidores y estudios de comportamiento de carga [4]; [2], se consideran como principal perturbación la debida a cambios en la carga, de dos tipos, sostenidos de pequeña amplitud, y desvanecientes de gran amplitud y corta duración.

El desempeño deseado del lazo de control se puede precisar, además condición de estabilidad interna, por las siguientes especificaciones sobre la respuesta temporal de la frecuencia, para un cambio de carga tipo escalón de amplitud hasta un 10% de la carga nominal e impulsiva de amplitud hasta un 50% de la carga nominal:

- Error a régimen permanente dentro del rango de ± 1 Hz.
- Tiempo de restablecimiento máximo de 1 min.
- Máximo sobrepaso de error lo menor posible.

El tiempo de restablecimiento se considera como el tiempo en que el error entra definitivamente en la zona de ± 1 Hz.

Se utilizó un esquema de control digital de frecuencia por carga secundaria, implantando el regulador en un dispositivo programable, como se muestra en la figura 1.

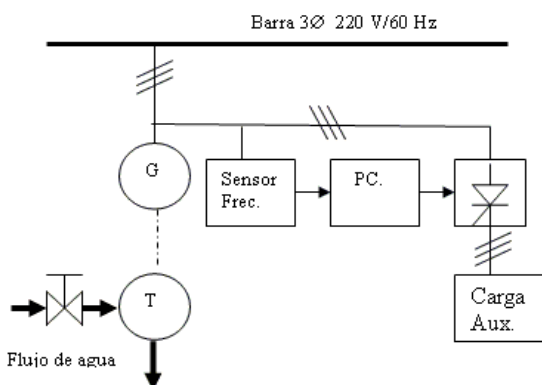


Fig.1 Esquema de regulación de frecuencia por carga lastre.

Se diseñó y ajustó un algoritmo de control digital con ayuda de una computadora personal PC utilizando el

MATLAB/SIMULINK, luego se implantó un prototipo de regulador, para probar y ajustar el lazo en condiciones reales de trabajo, en un sistema de investigación y desarrollo construido con este propósito, basado en un PC embebido y una tarjeta de adquisición de datos.

En el diseño del algoritmo de control se utilizó un modelo de la planta obtenido mediante un proceso de identificación, adquiriendo y procesando los datos de los experimentos en línea a través de un sistema de adquisición de datos en línea.

4. Identificación de la planta hidrogeneradora

Para el diseño del lazo de control aplicando métodos analíticos y técnicas de simulación se utilizó un modelo dinámico linealizado de la planta en el entorno a un punto de operación, que relaciona la variación de la frecuencia con un cambio en la potencia de carga. Sobre la base de modelos analíticos reportados [9, 10]; [10]; [4]; [2]; [11] y de la observación del comportamiento de datos de entrada-salida de plantas, se adoptó un modelo lineal de primer orden expresado por la función de transferencia

$$G_{fw}(s) = \frac{F(s)}{P_w(s)} = \frac{G_{fw}}{(1 + T_2 \cdot s)} \quad (1)$$

donde $F(s)$ y $P_w(s)$ son las transformadas de Laplace de las variaciones de frecuencia y potencia de carga respectivamente, G_{fw} es la ganancia estática y T_2 la constante de tiempo de la planta.

Los parámetros del modelo se estimaron mediante una identificación experimental, a partir de los datos de entrada-salida de la planta, aplicando el método basado en mínimos cuadrados ARX (Auto Regressive and eXogenous variables)[10]; [12], suministrado por la herramienta “*Systems Identification Toolbox*” del MATLAB.

Los experimentos consistieron en medir la variación de frecuencia debido a variaciones producidas en la carga, mediante la conexión y desconexión de un banco de resistencias trifásicas, estando la planta en un punto de operación estable. Para la realización de los experimentos, la medición y registro y almacenamiento de los datos, se utilizó un sistema basado en una computadora personal (PC) con una tarjeta de adquisición y un software desarrollado para estos fines.

Se realizaron un total 12 experimentos, 7 en horario diurno con potencia de generación de 6.14 kW y 5 experimentos en horario nocturno con potencia de generación de 9.54 kW. Las variaciones de carga producidas fueron de amplitud entre 2 kW y 5 kW con tiempos de duración entre 1 y 5 segundos. Los datos se midieron con período de muestreo de 0.05 segundos. Los resultados de la identificación se muestran en la tabla 1.

Como se aprecia existe incertidumbre en la estimación de los parámetros de la planta debido a errores de la

identificación y variaciones de sus valores por cambios en el punto de operación.

Tabla 1 Resultados de estimación de los parámetros del modelo

Parámetro	Valor nominal	Intervalo de variación
G_{fw} [Hz/kW]	3.42	1.31 - 5.51
T_2 [s]	3.58	1.89 - 4.96

5. Diseño y ajuste del algoritmo de control

Se diseñó y ajustó un controlador digital por el método de asignación de polos sobre la base de un modelo del lazo construido a partir del modelo de la planta (1), tomando los valores nominales de la tabla 1, y las características de las restantes componentes del lazo, el sensor de frecuencia, la unidad de disparo, el bloque de tiristores y la carga lastre. Se construyó un diagrama de bloques del lazo como se muestra en la figura 2.

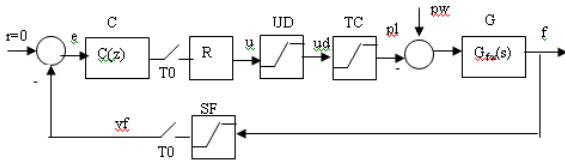


Fig. 2. Diagrama de bloques del lazo de control de frecuencia.

Donde C es el controlador, R un retenedor de orden cero, UD un limitador de la unidad de disparo para trabajar en la zona lineal, TC el bloque que incluye la unidad de disparo, los tiristores y la carga lastre, G el generador y SF el sensor de frecuencia. Todas las variables son en desviaciones donde: r es la referencia, e el error, u señal de control, ud la señal de control limitada que entra a la unidad de disparo, pl es la potencia disipada en la carga lastre, pw la perturbación en la potencia de carga, f la frecuencia eléctrica a la salida del generador, vf la tensión de salida del sensor de frecuencia, T0 es el período de muestreo.

Teniendo en cuenta la característica dinámica de la planta y el comportamiento deseado del lazo, se seleccionó un algoritmo de control PI de tiempo discreto con función de transferencia

$$C(z) = \frac{q_0 + q_1 \cdot z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (2)$$

Se ajustaron los parámetros de este, primero ajustando un controlador PI continuo considerando el lazo continuo y luego obteniendo una versión discreta de éste, con un período de muestro T0, tal que garantice un comportamiento similar al del lazo continuo.

Considerando el controlador PI con función de transferencia

$$\tilde{C}(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s}\right) \quad (3)$$

Partiendo de las especificaciones del lazo, planteadas anteriormente, se calcularon los parámetros K_p y T_i por asignación de polos, de manera que la respuesta a lazo

cerrado se comporte como un sistema de segundo orden con factor de amortiguamiento $\xi = 0.5$ y tiempo de establecimiento $t_s = 5$ s, que produce una frecuencia de oscilaciones amortiguadas $w_d = 1.59$ rad/s y un máximo sobrepaso de $M_p = 0.16$ Hz, obteniendo como resultado los valores

$$K_p = 1.63 \text{ y } T_i = 0.46 \quad (4)$$

Para obtener la versión discreta del controlador se seleccionó el período de muestreo T_0 con el criterio de que la frecuencia de muestreo $w_s \geq 20 \cdot w_d$ [13] tomando

$$T_0 = 0.05 \text{ s} \quad (5)$$

Finalmente se calcularon los parámetros del controlador discreto (2), aplicando las fórmulas [14]

$$q_0 = K_p; \quad q_1 = -K_p \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) \quad (6)$$

obteniendo los valores de ajuste

$$q_0 = 1.63; \quad q_1 = -1.46 \quad (7)$$

Se verificó el comportamiento del lazo por simulación construyendo un modelo SIMULINK del diagrama de bloques de la figura 2, observando las respuesta temporales de la salida ante perturbaciones de carga y calculando los índices de comportamiento, error a régimen, máximo sobrepaso y tiempo de establecimiento. Las respuesta temporales de la frecuencia a lazo abierto y lazo cerrado ante las perturbaciones se presentan en las figuras 3 y 4. Los índices de desempeño del lazo se muestran en la tabla 2. Como se aprecia se cumplen satisfactoriamente las especificaciones planteadas.

Tabla 2 Índices de desempeño del lazo

Perturbación	Mp [Hz]	Ere [Hz]	Tre [s]
Escalón 2.6 kW	0.13	0	1.5
Pulso 13 kW, 1s	0.6	0	2.5

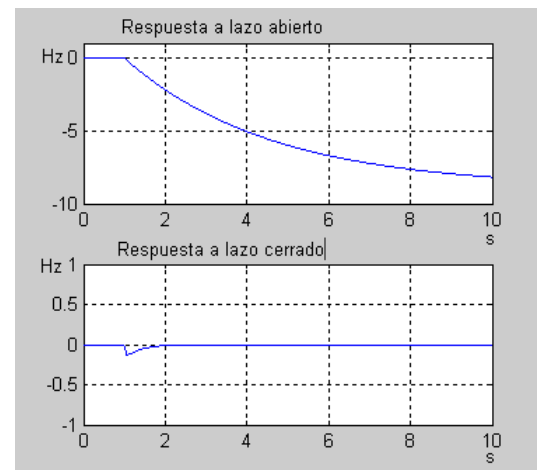


Fig. 3 Respuestas ante perturbación escalón de 2.6 kW de amplitud.

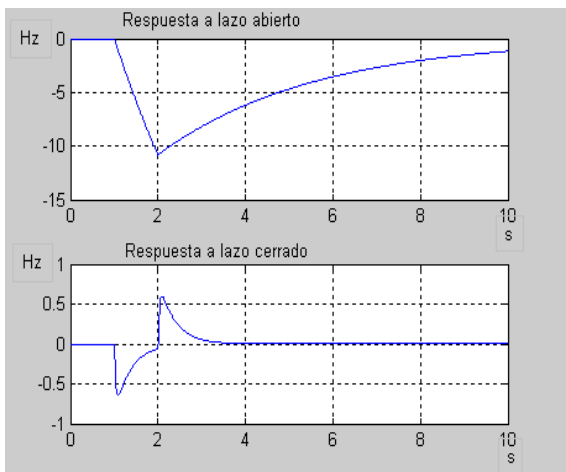


Fig. 4 Respuestas ante perturbación de pulso de 13 kW de amplitud y 1 segundo de duración.

6. Implantación del lazo de control

El regulador se implantó en un prototipo de investigación y desarrollo basado en un PC embebido y una tarjeta de adquisición de datos, montados en un armario conjuntamente con los restantes componentes del sistema de control, sensores de frecuencia, voltaje y corriente, el bloque de tiristores con su unidad de disparo y la fuente de alimentación.

Algunos datos técnicos son:

El programa de aplicación se desarrolló en una PC de propósito general y se descargó al PC embebido utilizando las herramientas de la biblioteca xPC del MATLAB 6.5, el PC embebido posee un procesador C3 a 800 MHz, 512 MB de RAM, cuatro puertos serie, dos puertos de red, audio onboard, memoria flash de 256 MB que funciona como disco duro, puertos para teclado y mouse, dos puertos USB, display. Posibilidad de conexión de un miniteclado de LCD y dispositivos como torre de discos floppy y disco duro. La tarjeta de adquisición de datos es la PCI-6024 E, cuenta con 16 entradas analógicas diferenciales u 8 simple terminal, dos salidas analógicas, 8 entradas/salidas digitales multiplexadas. El convertor es de 12 bits de aproximaciones sucesivas y su velocidad de 200 kS/s. Se dispone de transductores de frecuencia, tensión y corrientes con salidas 0-10 V, así como de transformadores de corriente de 200/5 A. Toda esta instrumentación facilita el desarrollo de reguladores de frecuencia y el estudio, de forma general, de las centrales hidrogeneradoras

El sistema de regulación se instaló y probó primero en una instalación de laboratorio con alternador de 5 kW y luego en la minihidroeléctrica de 26 kW para la cual se realizó el ajuste del PI, comprobándose su funcionamiento durante 24 horas en diferentes regímenes de carga. En todo momento se observó que se mantuvo la frecuencia dentro del rango de ± 1 Hz alrededor de los 60 Hz en presencia de variaciones súbitas de carga del orden de 1 kW, con una dinámica rápida, tiempo de restablecimiento menor de 30 segundos aunque con algunas oscilaciones.

7. Conclusiones

Se desarrolló un sistema basado en PC de control de frecuencia por carga lastre de una unidad minihidroeléctrica de 26 kW en operación aislada. El desarrollo del sistema incluyó la identificación dinámica de la planta, el diseño y ajuste del lazo por métodos analíticos, su verificación y refinamiento por técnicas de simulación en PC y finalmente su implantación en un prototipo de controlador basado en un PC embebido industrial con tarjeta de adquisición de datos, cuya eficacia fue comprobada en la instalación real.

La metodología empleada y los aseguramientos técnico y de programas desarrollados constituyen herramientas de desarrollo e investigación aplicables diseño e implantación de sistemas de regulación de unidades generadoras de pequeña potencia con características parecidas.

Para la versión final de trabajo se propone un regulador de menor costo implantado en un microcontrolador PIC de la familia 18FXX2, que se desarrolla actualmente.

Agradecimientos

Este trabajo es el resultado del proyecto de investigación entre la Universidad de Oriente y la Universidad Politécnica de Cataluña, con financiamiento del Centro de Cooperación para el Desarrollo (CCD) de la Universidad Politécnica de Cataluña y del Consorcio de la Escuela Industrial de Barcelona. Para la culminación exitosa de este proyecto resultó imprescindible también la ayuda brindada por el Centro de Innovación Tecnológica en Convertidores Estáticos y Accionamientos (CITCEA), centro perteneciente a la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)

Referencias bibliográficas

1. INRH, *Sitio Web Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. Empresa Nacional de Hidroenergía.* 2004.
2. Domínguez, H., "Modelado y simulación para el análisis y diseño de algoritmos de control de una pequeña unidad hidroeléctrica", in *Departamento de Control Automático.* 1999: Santiago de Cuba.
3. Martínez, R. "Regulador electrónico de frecuencia para una minihidroeléctrica". in *VII Encuentro Latinoamericano de pequeños aprovechamientos hidroenergéticos Hidrored.* 1997. Perú.
4. Domínguez, H., Arafet, P., Martínez, R., Milá, P. "Control de frecuencia de una minihidroeléctrica operando en modo aislado". in *Memorias de la Conferencia Internacional de FIE 2000.* 2000.
5. Martínez, R., "Control de frecuencia de un alternador de una Minihidroeléctrica mediante modo deslizante". in *Departamento de Control Automático.* 1999, Universidad de Oriente: Santiago de Cuba.
6. Martínez, R., Domínguez, H., Fong, J., Pino, R. Milá, P. "Control de frecuencia de un alternador de una minihidroeléctrica mediante modo deslizante". in *Memorias de la Conferencia Internacional de FIE*

2000. 2000. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba.
7. Souza, Z.D., "*Centrais Hidroelétricas. Dimensionamiento de componentes*". 1992, Brasil: Edit. Edgar Blücher LTDA.
 8. Viteri, C., "*Apuntes para un manual de diseño, estandarización y fabricación de equipos para Pequeñas Centrales Hidroeléctricas*". OLADE, 1988. V.
 9. Ollero A, M.R., Bernárdez J., "*Minicentral hidráulica, modelado y control de un grupo turbina-alternador*". Mundo Electrónico, 1987. **174**: p. pp 75-81.
 10. Ollero, A., "*Control por computadora. Descripción interna y diseño óptimo*", ed. . 1991, España,: Edit. Marcombo. Barcelona.
 11. Caicedo, D.G. "*Gobernadores de turbinas hidráulicas*". in *Memorias Primer Encuentro Nacional de Automática*. 1993. Cali. Colombia.
 12. Aguado, B.A., *Temas de Identificación y Control Adaptable*. Alberto Aguado Behar ed, ed. M.y.F. Instituto de Cibernética. 2000, La Habana.
 13. Ogata, K., "*Sistemas de Control en Tiempo Discreto*", ed. M. Prentice Hall Hispanoamericana SA. 1996.
 14. Isermann, *Digital Control Systems*.