

Ajuste del punto de operación de micro-turbinas hidráulicas a través del método de regulación de velocidad combinada

Adjustment of the operation point of hydraulic micro-turbines through the combined speed regulation method

MSc. Leonardo Peña-Pupo^I, Dr.C. Ernesto Yoel Fariñas-Wong^{II},
MSc. Hugo Domínguez-Abreu^{III}, MSc. Julio Fong-Barrio^{III}

^IEmpresa de Hidroenergía, Cuba; ^{II}Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Cuba; ^{III}Departamento Informática, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba

leonardo@stg.hidroe.une.cu

Resumen

En este trabajo se presenta una propuesta de seguimiento del punto de operación de las micro turbinas hidráulicas en las instalaciones hidroenergéticas que trabajan en régimen autónomo. Se pretende ajustar automáticamente el punto de operación al que impone la demanda mediante el control combinado de carga y gasto. Se presentan resultados de simulación en ambiente *Matlab*[®]/*Simulink* con modelos obtenidos a través de vías analíticas y comprobados con técnicas de identificación experimental. Los resultados muestran que el ajuste único del punto de operación mediante la regulación por carga a pesar de tener mejores prestaciones que la regulación del gasto y ser la más empleada en las micro-turbinas hidráulicas, no aprovecha de forma óptima el portador energético. Por último, se presentan los resultados de simulación, algunas consideraciones sobre su desempeño, limitaciones y trabajos futuros.

Palabras clave: punto de operación de Micro-turbinas hidráulicas, operación de micro hidroeléctricas autónomas, métodos de regulación de velocidad.

Abstract

In this work a proposal of following the point of operation of hydraulic micro-turbines in autonomous operation regime is presented. It is sought to adjust the operation point automatically to which imposes the demand by means of the combined control of load and flow. Simulation results are presented in *Matlab*[®]/*Simulink* with models obtained through analytic and proven with methods of experimental identification. Lastly, the results of simulation are presented of combining both methods, some performance considerations, limitations and future works.

Keywords: micro-hydropower operation point; Autonomous operation; speed control methods.

Introducción

En la actualidad, la brecha entre la oferta y la demanda de energía eléctrica aumenta cada día. Por otro lado, el potencial energético del flujo de agua en pequeños ríos puede ser explotado por una micro planta hidroeléctrica. Las centrales hidroeléctricas se clasifican en general como a pie de presa y de pasada o también conocidas como a “filo de agua”[1]. Tienen un impacto ambiental menor debido a que utiliza un flujo instantáneo de agua para

impulsar las turbinas [2] y puede ser ventajoso ya que no conduce a la reubicación de personas. La hidroeléctrica de pasada es un tipo de generación de energía hidroeléctrica donde se proporciona poco o ningún almacenamiento de agua [3] y el reservorio de almacenamiento se conoce como estanque [4], (figura 1).

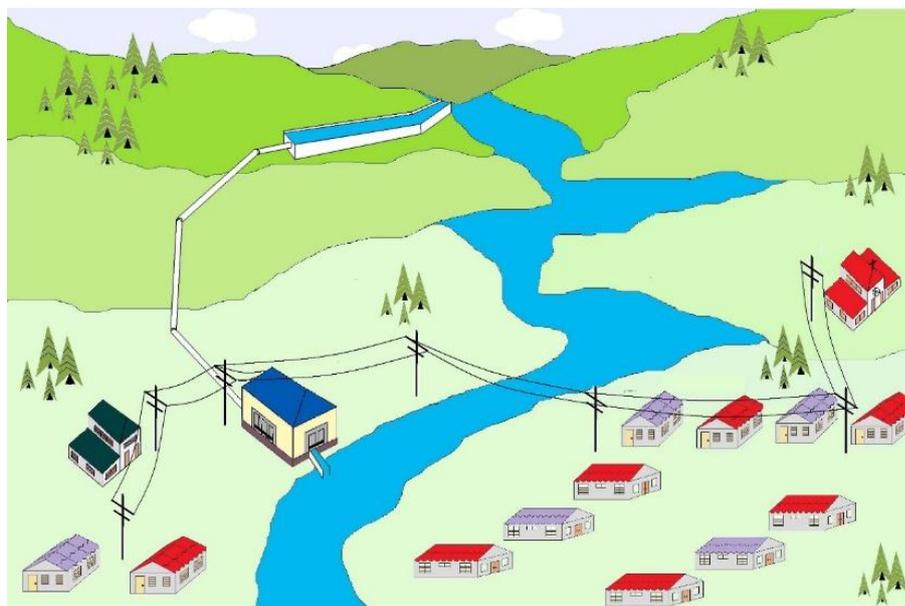


Fig. 1. Micro central Hidroeléctrica de pasada o “a filo de agua”

Estas plantas desempeñan un papel vital en la electrificación rural de los países en desarrollo como una generación de energía descentralizada y, por lo general, funcionan en régimen autónomo: fuera de la red y como una fuente única de energía [5,6]. Cuba tiene 144 centrales hidroeléctricas en funcionamiento, el 74% (107) de las cuales se encuentran en regiones montañosas aisladas del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), lo que permite el suministro de energía de muchas personas además de lugares sociales y económicos [7]. Del total de 107 mini y micro hidroeléctricas de Cuba solo 6 disponen de algún mecanismo de regulación de la velocidad de rotación de turbina, lo que implica muy baja calidad de la energía según las normas del SEN [8,9] y, como consecuencia no incentiva el consumo de energía. Por otro lado, solo seis del total de centrales autónomas cubanas poseen mecanismos de regulación de frecuencia, todas mediante carga secundaria [10].

La elección de la tecnología de la turbina está dictada por los parámetros hidráulicos y topográficos y, por lo tanto, es altamente inflexible. Las turbinas se diseñan para un valor de carga y gasto predeterminados que definen la zona

de operación de ellas [11,12]. Cualquier variación de estos parámetros se compensa abriendo o cerrando los dispositivos de control del gasto, tales como álabes directrices, válvulas o compuertas, a fin de mantener constante, ya sea la potencia de salida a la red, o el caudal que atraviesa la turbina[13,14]. El funcionamiento de las turbinas hidráulicas está dado por una serie de curvas características entre las que se encuentra la de potencia *versus* gasto, (figura 2). Nótese que el punto en que opera la turbina depende del régimen de carga y puede ser ajustado a través del flujo de agua a la entrada de la turbina como rige la expresión (1).

$$P = 9,81 * Q * H * \eta \quad (1)$$

Este trabajo aborda el ajuste automático del punto de operación de las micro-turbinas hidráulicas que operan en modo autónomo a través de la combinación de la regulación por caudal (flujo) y carga secundaria. Se presenta el modelado en funciones de transferencia y su simulación en Matlab®/Simulink. Se comparan los resultados de la simulación dinámica del método del control por carga y flujo por si solos para la regulación de la velocidad de la turbina; así como la combinación de ambos métodos como vía de ajustar el punto de operación de la turbina.

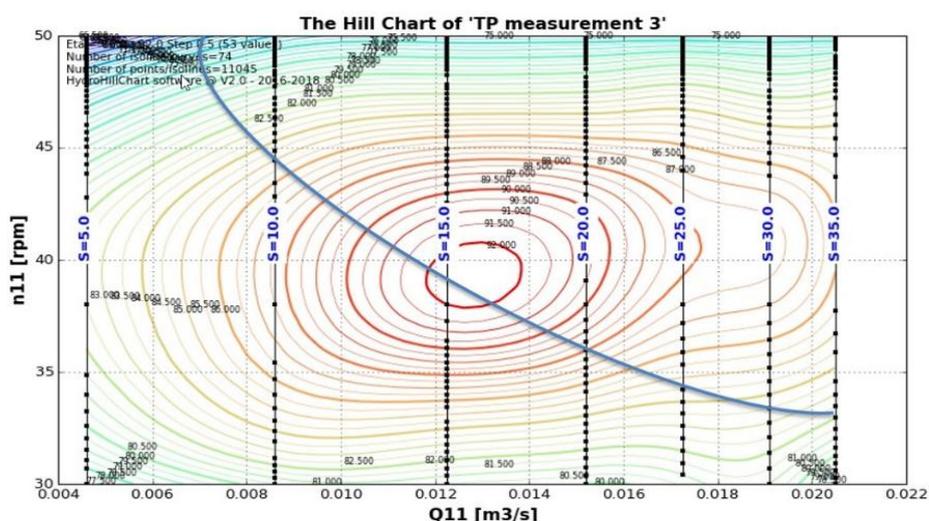


Fig. 2. Curva característica de trabajo de turbinas hidráulicas.
Fuente: adaptado de HydroHillChart [15]

Fundamentación teórica

Las micro centrales hidroeléctricas de Cuba a menudo presentan problemas de operación, las principales causas según [13,14] son: pobre control de la frecuencia (figura 3) y la potencia, deficiente distribución de la demanda. De igual forma otros factores de diseño también implican problemas en la operación como: excesiva relación entre la longitud de la tubería y la carga hidráulica (L/H), momento de inercia ($GD^2/4g$) inadecuado [16], entre otros factores operacionales y de diseño. Todos estos aspectos se resumen en una baja calidad de la energía y una baja eficiencia energética que causa que los hidrogramas operen fuera de su punto de operación óptimo. En la figura 3 se muestra el comportamiento de la frecuencia eléctrica generada por una micro hidroeléctrica en un día típico. Nótese que el valor de la frecuencia eléctrica generada (proporcional a la velocidad de rotación de la turbina) oscila fuera de los límites operacionales establecidos. En el caso de sistemas de pequeña potencia aislados del SEN, a falta de una norma específica, se considera que los valores nominales de frecuencia se encuentran en el rango de $\pm 2\%$ instantáneos y $\pm 5\%$ en un minuto.

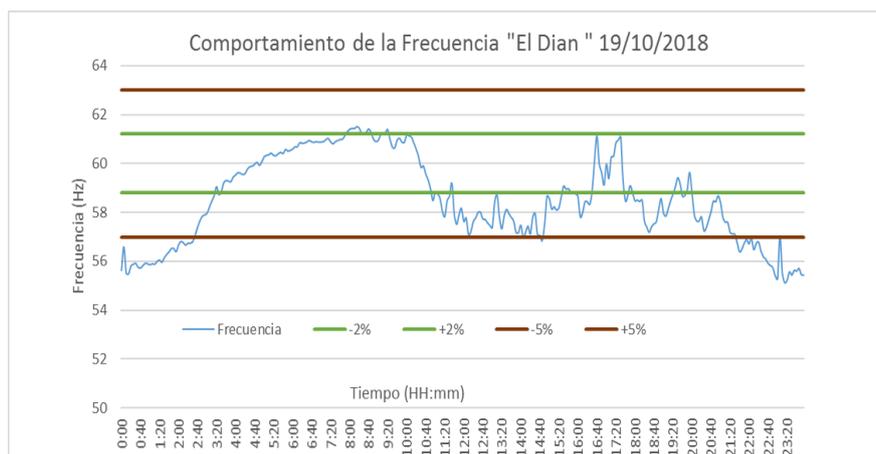


Fig. 3. Comportamiento típico de la Frecuencia de una micro-Hidroeléctrica sin regulación. Fuente: Adaptado de (López, 2018)

El 90% de las micro hidroeléctricas de Cuba operan con turbinas Pelton [7] estas tienen capacidades de regulación de frecuencia limitadas debido a los efectos de la inercia del agua [18] resultado del circuito hidráulico de carga alta y por el gran valor del tiempo de apertura de los inyectores, adoptado para evitar problemas de sobrepresión transitoria en la

compuerta [19], causando que la onda de presión viaje aproximadamente a 1200m/s de velocidad [20].

Desde el punto de vista de la operación de micro-centrales hidroeléctricas, se conocen dos formas de regular la frecuencia eléctrica generada: manipulando el flujo de agua que ingresa a la turbina y ajustando la carga del generador [4,20]. Mientras que el primer método persigue ajustar el punto de operación de la turbina regulando la cantidad de flujo de agua que ingresa a la entrada de la turbina [21]; el segundo pretende que la turbina trabaje en un punto de operación fijo, generalmente a potencia máxima equilibrando las cargas de los usuarios y una carga resistiva conectada en paralelo [6,22]. En la figura 4 se muestran los dos métodos descritos, representados por los números 1 y 2 respectivamente.

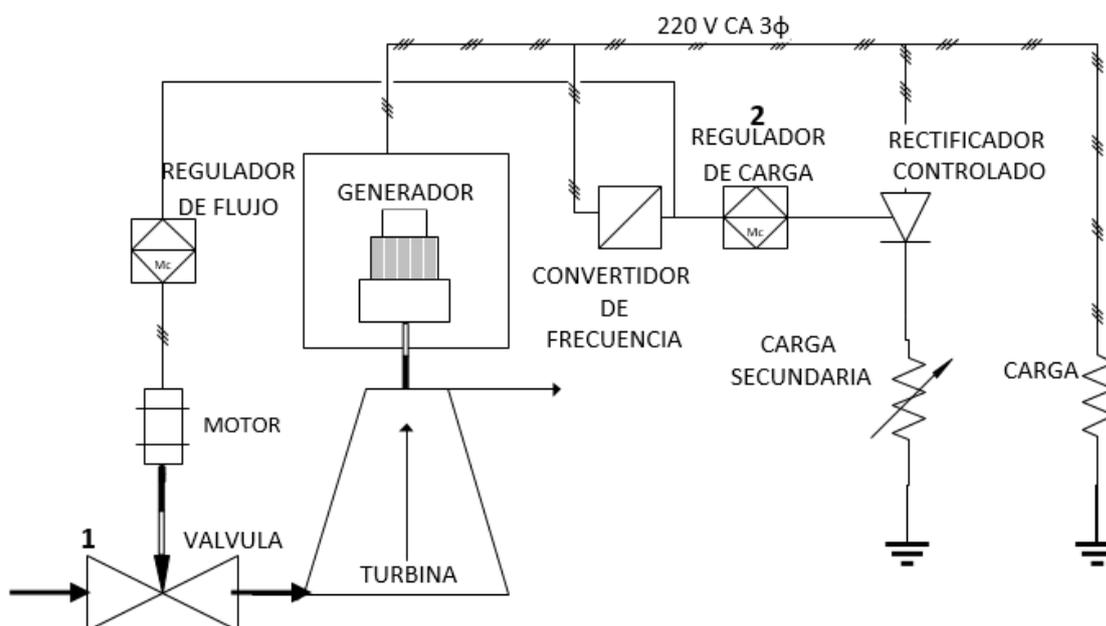


Fig. 4. Esquema de regulación combinado de micro-hidroeléctricas autónomas.
1) Regulación por flujo, 2) Regulación por carga

Para mantener el punto de operación deseado manteniendo la velocidad nominal de la turbina, se reportan varios enfoques en la literatura especializada, algunos consideran emplear los sistemas de almacenamiento en energía mecánica a través de volantes de inercia [23], sistemas interconectados como en, [19,24] micro redes [25,26] y almacenamiento de energía eléctrica [27,29]. Otro método, con un desarrollo relativamente reciente consiste en ajustar el punto de operación al máximo impuesto por la carga

mediante el uso de generadores asíncronos conectados a las turbinas Kaplan [30,31]; esto implica un cambio en la concepción del control de velocidad y, por lo tanto, cambiar el grupo turbina-generator en aquellos que están operando. Desde el punto de vista económico, aún no se ha reportado sea una solución factible. La vía de los sistemas interconectados y micro redes aisladas como en [32] está fuera del alcance de los sistemas autónomos.

El control de la carga secundaria tiene un diseño más sencillo y buen desempeño frente a perturbaciones impulsivas y escalonadas; sin embargo en los diseños clásicos, la potencia nominal de la carga secundaria se elige en un 30% más alta que la potencia de carga nominal [33]. En este caso, se demuestra que es rentable solo cuando se requiere agua caliente para otros usos [34,35]. Otro relativo inconveniente está relacionado con la presencia de armónicos causado por la conmutación del rectificador controlado, lo cual es soluble aplicando las técnicas descritas por algunos autores [36].

Algunos trabajos igualan la potencia secundaria a la nominal de la planta, pero a un costo elevado [37]. Otros trabajos plantean la reducción de la carga secundaria a un 50 % de la potencia nominal a través del ajuste del caudal de la turbina [37]. En trabajos anteriores de los autores se realiza el control de la velocidad de una turbina mediante el ajuste de carga [6, 38,39] con un valor nominal de la carga secundaria igual al 30 % del valor del generador. Se ha presentado una revisión de los últimos 20 artículos publicados en el área del control por carga [23], este plantea la necesidad de aprovechar la energía consumida en la carga secundaria de forma diferente, lo que a juicio de los autores podría ser a través de: iluminación, corrección de voltaje o en algún tipo de almacenamiento energético.

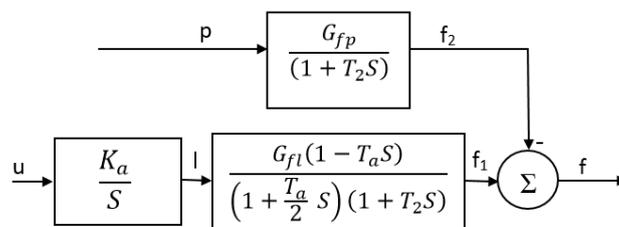
Los autores de este trabajo creen que la combinación de los dos métodos es una forma intuitiva de aprovechar más eficientemente el portador energético y garantizar la requerida calidad de la energía. En esta forma de operación, subyace un necesario ajuste del punto de operación de la turbina tal que se pueda ajustar a las fluctuaciones de la demanda, suministrando la energía en los estándares de calidad establecidos y aprovechando más eficientemente el portador energético.

Métodos utilizados y condiciones experimentales

A través de una amplia revisión bibliográfica se detallan en este artículo los antecedentes de la regulación de velocidad por carga y por flujo, así como su posible combinación para mejorar el seguimiento del punto de operación de micro turbinas hidráulicas, de igual forma se caracteriza el contexto actual de la temática en Cuba y algunos requerimientos técnicos. Mediante un estudio de caso, correspondiente a la micro-central hidroeléctrica “El Dian”, del municipio Guamá, provincia Santiago de Cuba, se realiza una evaluación del comportamiento dinámico de la planta y se diseñan los algoritmos de control para los lazos de control de carga y flujo. Se evalúa el desempeño de la combinación de ambos métodos.

Fue simulado mediante Matlab®/Simulink el modelo en funciones de transferencia de una micro-central hidroeléctrica de 100 kW. A través del método de asignación de polos, con los modelos analíticos generales desarrollados por algunos autores[20] fueron diseñados los lazos de control de carga y flujo descritos en la figura 4. Estos modelos además, fueron obtenidos por identificación experimental [40] y han sido los empleados para el diseño de algoritmos de control en los trabajos del Grupo de Automatización de Fuentes de Energía Renovables (AFER) de la Universidad de Oriente y en trabajos previos [6,21,38,41-43].

El modelo mostrado en la figura 5, fue linealizado en entornos a un punto de operación correspondiente a la mitad de la potencia nominal y representado mediante funciones de transferencia. Como mecanismo actuador sobre el flujo de agua a la entada de la turbina, fue adaptado un servomotor que mueve la válvula de aguja de una turbina Pelton, en un rango limitado $[\Delta]$ con comportamiento integral (figura 4). El mecanismo que actúa sobre la carga secundaria es un puente rectificador trifásico controlado que gobierna una carga resistiva (figura 4).



**Fig. 5-Diagrama de bloques del modelo de una micro-hidroeléctrica.
Fuente (Domínguez, 1999)**

donde

$$T_a = \frac{\sum L * V}{g * H} \quad (2)$$

Se conoce como el tiempo de inicio (arranque en algunas literaturas) del agua y se define como el tiempo necesario por una masa de agua a una altura determinada (H) y desde el reposo, para alcanzar la velocidad (V) a través de una longitud de tubería (L). El rango de variación típico de esta constante es ($0.5 s \leq T_a \leq 4 s$) a plena carga y cambia con el punto de operación [20]. Es usual, particularmente en las centrales cubanas, que el conducto forzado no sea de diámetro único, razón por la que en la expresión 2 se expresa como sumatoria de longitudes por las velocidades correspondientes. Es una constante muy importante en el diseño de centrales hidráulicas [11] y para turbinas de reacción se toma en consideración además, el aporte a esta constante de la cámara espiral de las turbina [13].

Un aspecto característico de las turbinas hidráulicas, desde el punto de vista de su comportamiento dinámico, es la existencia de un sistema de fase no mínima: [20] presencia de un cero en el semiplano derecho (figura 5). Esta característica unida a las restricciones del tiempo de cierre de los elementos de admisión hace que el controlador deba ser adecuadamente diseñado para evitar el fenómeno del golpe de ariete y lograr estabilidad. Algunos procesos industriales presentan similar comportamiento de respuesta inversa, como es el caso del control de nivel de calderas de vapor y la composición de fondo en columnas de destilación.

Toda vez que el punto de operación de la turbina lo define el nivel de carga y el control por carga consiste en balancear, a través de una carga secundaria (P_l),

el exceso o defecto de potencia requerido por los usuarios (P_u); el ajuste del punto de operación estará definido por la siguiente expresión:

$$\Delta P_T = \Delta P_u + \Delta P_{l_{m\acute{a}x}} \quad (3)$$

Y la decisión de ajuste del punto de operación en función de la potencia demandada cuando:

$$f(P_u) = 1$$

$$f(P_u) = \begin{cases} 0, & \text{si } |\Delta P_u| \leq |\Delta P_{l_{m\acute{a}x}}| \\ 1, & \text{si } |\Delta P_u| > |\Delta P_{l_{m\acute{a}x}}| \end{cases}$$

En la figura 6. Se muestra cómo varía el punto de operación de la turbina con la regulación automática combinada carga-flujo. En función del gasto a la entrada de la turbina varía su eficiencia η (figura 6 curva a) y a su vez el gasto y la eficiencia definen el punto de operación que demanda la carga (figura 6 curva b) según la expresión (3). La potencia máxima alcanzable es de 100 kW como puede verse en la curva b, correspondiente a una carga hidráulica de 140 m y un gasto de 90 litros por segundo.

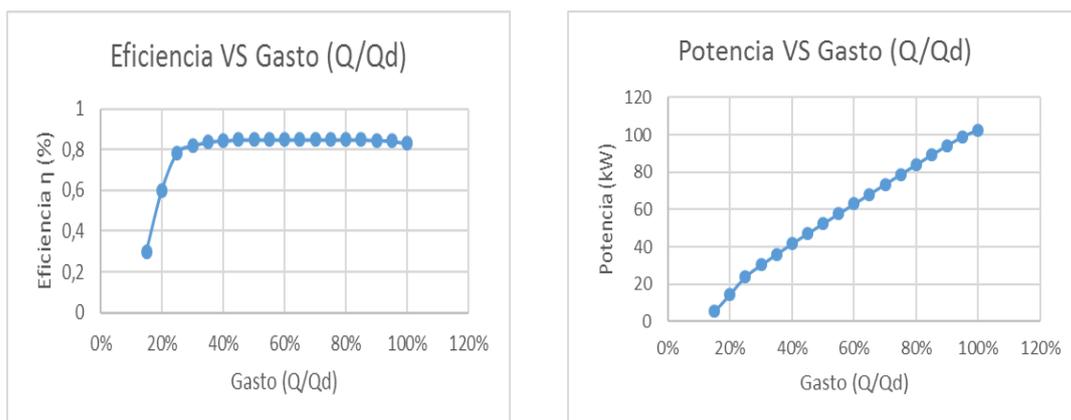


Fig. 6. Variación del punto de operación con la regulación combinada. Curva característica de Eficiencia (a) y Potencia (b) versus Gasto

Resultados y discusión del ajuste del esquema combinado carga-flujo

Teniendo en cuenta que la dinámica del lazo de control por carga es menor que la del control por flujo ($T_2 \gg T_a$), se pueden diseñar los dos lazos de control de forma independiente. Dado que el regulador por carga es más rápido toda vez que la constante de tiempo depende de elementos electrónicos y se desea obtener error cero a estado estacionario en el comportamiento de la frecuencia,

se diseñará un regulador proporcional integral (PI). Para el caso del regulador por flujo, la presencia de un sistema de fase no mínima condiciona el empleo de una acción anticipatoria (acción derivativa), de igual forma, la acción integral está presente toda vez que la característica dinámica del elemento de acción sobre la válvula de admisión es de tipo integral como puede verse en la figura 5. En la figura 7 se muestra el sistema de control combinado carga-flujo propuesto que permite el ajuste automático del punto de operación de la turbina.

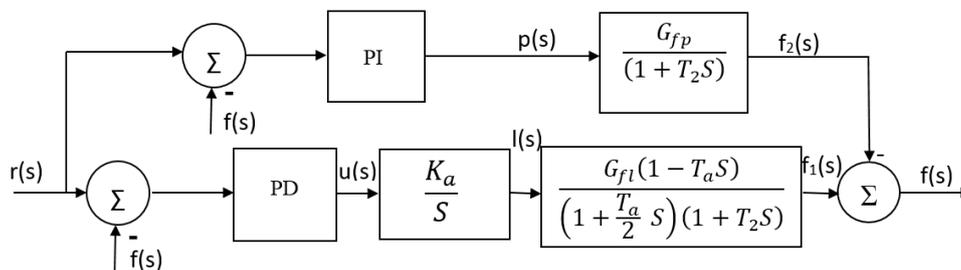


Fig. 7. Diagrama de bloques del sistema de control combinado

Dadas la función de transferencia de un regulador PI definida por (4) y la función de transferencia a lazo abierto, del lazo por carga definida en (5).

$$G_{cc}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (4)$$

$$G_{pc}(s) = \frac{G_{fp}}{(1+T_2 s)} \quad (5)$$

Empleando el método de asignación de polos, consistente en obtener los valores de la constante de acción proporcional K_p y constante de tiempo de acción integral T_i tales que, los polos dominantes de la función de transferencia a lazo cerrado, de la frecuencia con respecto a una perturbación tipo escalón, produzca un comportamiento similar al de un polinomio de segundo orden como el representado en (6).

$$P(s) = s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 \quad (6)$$

Los polos $p_{(1,2)} = (-\delta \pm j\omega_d)$ están relacionados con el factor de amortiguamiento (ξ), tiempo de establecimiento (t_s) y máximo sobrepaso (m_p) según las expresiones (7), (8), (9) y (10).

$$\delta = \frac{4,6}{t_s} \quad (7)$$

$$\xi = 0,6 * (1 - m_p) \quad (8)$$

$$\omega_n = \frac{\delta}{\xi} \quad (9)$$

$$\omega_d = \omega_n * \sqrt{1 - \xi^2} \quad (10)$$

Igualando el polinomio característico de la función de transferencia a lazo cerrado $(1 + G_{cc} * G_{pc})$ con el polinomio deseado representado por (5). Se obtienen los valores de las constantes de tiempo del regulador PI según (11) y (12).

$$K_p = \frac{(2 * \delta * T_2 - 1)}{G_{fp}} \quad (11)$$

$$T_i = \frac{K_p * G_{fp}}{T_2 * (\delta^2 + \omega_d^2)} \quad (12)$$

Mediante el procedimiento descrito para el regulador por carga, se diseña el regulador por flujo con función de transferencia $G_{cf}(s)$ y la función de transferencia por flujo a lazo abierto $G_{pf}(s)$ definida en (13 y 14). La función de transferencia del actuador integral se considera convenientemente parte del regulador. En la práctica, este regulador proporcional derivativo (PD) se comporta como un PI al considerar la acción integral de la válvula. Para este caso el polinomio característico y por tanto el deseado, son de tercer orden.

Al determinar la función de transferencia lazo cerrado $(1 + G_{cf} * G_{pf})$ e igualar ambos polinomios se obtienen las expresiones de K_p y T_i siguientes que definen los parámetros de ajuste del regulador por flujo:

$$K_p = \frac{10T_a T_2 \delta (\delta^2 + \omega_d^2)}{K_a G_{fl}} \quad (13)$$

$$T_d = \frac{\frac{T_a}{2} + T_2 - 22\delta}{T_a G_{fl}} \quad (14)$$

Fueron ajustados los dos lazos de control siguiendo el método de asignación de polos descrito en [39] para los dos lazos por separado; de modo que el comportamiento deseado de la frecuencia cumpla con: Error a régimen estacionario dentro del rango de ± 1 Hz, tiempo de establecimiento menor de 60 s, máximo sobrepaso del error dentro del rango ± 1.5 Hz. En las figuras 7 y 8 se muestran el comportamiento de la frecuencia (a), demanda de carga (b), potencia secundaria (c) y desplazamiento del vástago de la válvula (d) respectivamente. La figura 7 muestra la respuesta de la planta antes perturbaciones de carga en el rango de la potencia secundaria. Sin embargo, la figura 8 muestra el comportamiento de la planta cuando las variaciones de carga son mayores que la carga secundaria. Las variaciones de carga se simularon según el diseño presentado en la tabla 1, (figuras 7 (b) y 8 (b)).

Tabla 1
Tipo y magnitudes de perturbaciones simuladas

	Tipo	Tiempo (s)	Amplitud (kW)	Duración (s)	P_1/P_T (%)
Figura 7	Pulso	2	5	2	11
	Escalón	20/30	3/6	-	6,6 / 13,3
Figura 8	Pulso	2	5	3	11
	Escalón	20/30	3/7	-	6,6 / 15,5

Como se aprecia, la frecuencia (figuras 8(a) y 9(a)) se comporta dentro de los valores deseados ante todas las perturbaciones simuladas, logrando alcanzar el valor deseado (60 Hz) en 25 s para el peor de los casos (figura 8(a)). Cabe destacar que cuando las variaciones de la demanda están dentro del rango de variación de la carga secundaria (figura 8), la regulación combinada actúa de forma que, al compensar las perturbaciones, la regulación por flujo actúa haciendo que se vuelva al mismo punto de operación inicial (figura 8(d)). Sin embargo, cuando las perturbaciones son mayores que la carga secundaria, la diferencia de carga no compensada impone un ajuste del punto de operación según la expresión (3) a otro en función de la magnitud de la perturbación, tal como se muestra en la figura 9(d).

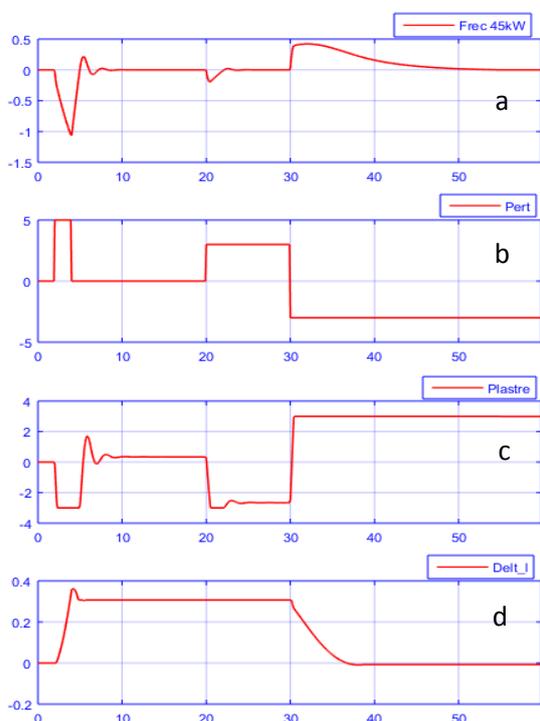


Fig.8. Respuesta de la planta con los métodos de regulación combinada ante perturbaciones de carga en el rango de la potencia secundaria.

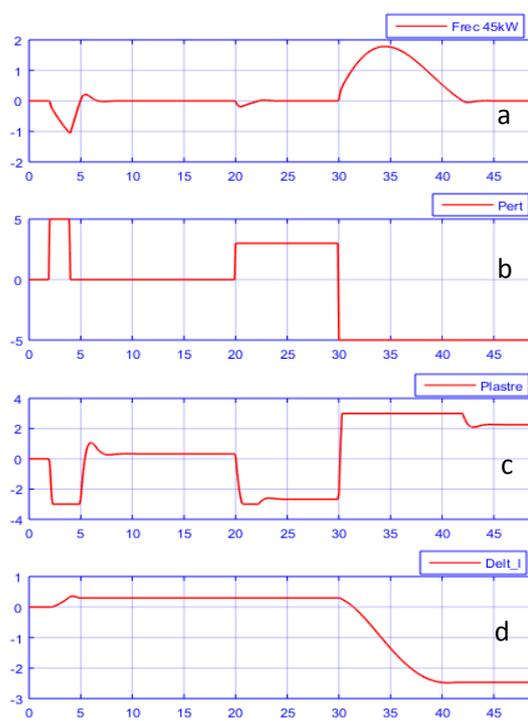


Fig. 9. Respuesta la planta con los métodos de regulación combinada ante perturbaciones mayores que la potencia secundaria

Conclusiones

1. **Con la propuesta presentada en este trabajo, consistente en ajustar el punto de operación de las micro turbinas hidráulicas que trabajan de forma autónoma, se logra aumentar la calidad de la energía generada en las micro-centrales hidroeléctricas cubanas. De esta forma el aprovechamiento energético en estas centrales es mayor toda vez que se incentiva el consumo de energía, generando con determinados estándares de calidad referidos a las variaciones de la frecuencia generada.**
2. **Con la combinación, como se aprecia en los resultados obtenidos, se aprovecha más eficientemente las ventajas de rapidez del control por carga y el seguimiento de la demanda del control por flujo, lo que garantiza un mejor aprovechamiento del portador energético. Los lazos de control fueron ajustados de forma que la respuesta dinámica de la frecuencia cumple con los requerimientos**

de diseño para redes aisladas e incluso para su eventual interconexión con otras mayores.

- 3. Según los experimentos realizados, las variaciones de frecuencia permanecen dentro del rango permisible de $\pm 0,5$ Hz ante variaciones de carga impulsivas de hasta un 11 % respecto a la potencia del generador y $\pm 1,8$ Hz del tipo escalón de hasta un 15,5 %. Los tiempos de establecimiento, en ambos casos son menores a los deseados, con 5 s ante cargas impulsivas de un 11% y 12 s para aumentos de carga sostenidos. En futuros trabajos los autores se plantean la sustitución de la carga resistiva por otras vías que aprovechen más eficientemente la energía generada.**

Nomenclatura

P : Potencia [kW]

Q : Gasto [m^3/s]

H : Carga hidráulica [m]

η : Eficiencia

f : Frecuencia de la tensión generada [Hz]

Δl : Desplazamiento del vástago de la válvula de admisión de la turbina [mm]

T_a : Tiempo de arranque del agua [s]

T_2 : Constante de tiempo del grupo turbina generador [s]

K_a : Ganancia del actuador hidráulico.

G_{fl} y G_{fp} : Ganancia a régimen estacionario de la frecuencia respecto al desplazamiento del vástago de la válvula de admisión y la potencia eléctrica, respectivamente.

$P_{l,m\acute{a}x}$: Potencia máxima en la carga secundaria ($\Delta P_{l,m\acute{a}x} = 6 \text{ kW}$)

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen la valiosa y desinteresada contribución del Profesor: PhD. Dorian Nedelcu, "EftimieMurgu" University of Reșița. Rumanía, en la construcción de la curva de rendimiento de la Turbina Pelton TP-15 mediante el software de su autoría **HydroHillChart**.

Referencias bibliográficas

1. IRENA "Renewable energy technologies: cost analysis series". www.irena.org: IRENA. 2012.
2. KUMAR V S, SINGAL S K. "Operation of hydro power plants-a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, 69, pp.610-619
3. WUBE D A. "Design and Analysis of Small Hydro Power for Rural Electrification", *Global Journal of Researchers in Engineering: F Electrical and Electronics Engineering*. 2016,16 (6), ISSN:Online ISSN: 2249-4596 & Print ISSN: 0975-5861
4. SHARMA H, SINGH J. "Run off River Plant: Status and Prospects", *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. 2013, 3 (2), ISSN:ISSN: 2278-3075
5. ASHFAQ H, SAOOD M, SINGH R. "Autonomous micro-hydro power system for distributed generation: A power quality analysis", *International Journal of Current Engineering and Scientific Research (IJCESR)*. 2015, 2(9), ISSN: 2393-8374, (ONLINE): 2394-0697
6. PEÑA P L, DOMÍNGUEZ A H, BARRIO J F, CHANG F. "Regulación de frecuencia por carga secundaria de una Minihidroeléctrica en régimen autónomo". In: Feijoo, ed. *XII Simposio de Ingeniería Eléctrica*. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. 2005.
7. HIDROENERGÍA. "Estado de las Instalaciones actualizado 30-10-2018". Empresa de Hidroenergía: Unión Eléctrica. 2018.
8. NC62-04. "Sistema Electroenergético Nacional. Frecuencia nominal y sus desviaciones permisibles". www.nc.cubaindustria.cu: Oficina Nacional de Normalización. 1981, p. 3.
9. NC800. Reglamento Electrotécnico Cubano para Instalaciones Eéctricas en Edificaciones NC 800:2017 (Ed. 2.0). www.nc.cubaindustria.cu: Oficina Nacional de Normalización 2017.
10. HIDALGO G R. "Estado de la Automática en las Hidroeléctricas de Cuba". In: Pupo L P, ed. *Entrevista al Director de Desarrollo*. Empresa de Hidroenergía. Dirección de Desarrollo. 2018.
11. HRC. *Small Hydropower*. A Textbook Specially Designed for Trining Workshops in TCDC Program. 1ra ed: Zhejiang University Press. 2006.

12. ESHA. "Manual de Pequeña Hidraulica: Cómo llevar a buen fin un proyecto de minicentral hidroeléctrica". 1998.
13. SOUZA Z D, MOREIRA S A H, DA COSTA B E. "Centrais hidrelétricas: implantação e comissionamento". 3. ed. 2018.
14. CEI. "IEC 61362. Guía para la especificación de los sistemas de regulación de las turbinas Hidráulicas". Primera edición 1998-03. Asociación Española de Normalización y Certificación. AENOR. 1998.
15. NEDELICU, D. BOSTAN, A., PERIS-BENDU, F. *HydroHillChart: Pelton module Software used to Calculate the Hill Chart of the Pelton Hydraulic Turbines*. ANALELE UNIVERSITĂȚII. "EFTIMIE MURGU" REȘIȚA. 32(1), 2015. ISSN 1453 - 7397
16. GARCÍA FAURE, L. G. "Macro optimización del proyecto y la explotación de las pequeñas centrales hidroeléctricas de las regiones montañosas". Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas: Universidad de Oriente,2005.
17. HIDROENERGÍA "Banco de Problemas de las Instalaciones Hidroeléctricas": Unión Eléctrica. 2018.
18. ILIEV V, PREDAG P, MARKOV Z. "Transient Phenomena Analysis in Hydropower Plants at Off-Design Operating Conditions", *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2012, 2 (6), p. 8, 1480-1488
19. DREIDY M, MOKHLIS H, MEKHILEF S. "Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, 69, pp.144-155, DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.170>
20. PRABHA K. "Power System Stability and Control": McGraw-Hill Inc. 1994.
21. DOMÍNGUEZ H, ARAFET P, CHANG F, PEÑA L, ALMAGUER H. "Control combinado borroso de la frecuencia de una unidad minihidroeléctrica en operación autónoma". *XIV Congreso Brasileiro de Automática* Natal-RN. Brasil. 2002.
22. KUMAR R. "Review and Analysis on Electronic Load Controller", *International Journal of Engineering Sciences & Management*. 2017.
23. KHODADOOST A A A, KARAMI H, GHAREHPETIAN G B, HEJAZI M S A. "Review of Flywheel Energy Storage Systems structures and applications in

- power systems and microgrids", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017,69, pp. 9-18.
24. DATTA A, BHATTACHARJEE K, DEBBARMA S, KAR B. "Load Frequency Control of a Renewable Energy Sources based Hybrid System". In: IEEE, ed. *2015 IEEE Conference on Systems, Process and Control (ICSPC 2015)*. Bandar Sunway, Malaysia 2015.
25. SEBASTIÁN R, QUESADA J. "Modeling and simulation of an isolated wind Hydro Power System". In: IEEE, ed. *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Florence, Italy. 2016, pp. 4169-4174.
26. MOHANRAJAN S R, VIJAYAKUMARI A, KOTTAYIL S K. "Power Balancing in Autonomous Micro Grid with Variable Speed Pump". In: IEEE, ed. *IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI-2017)*. 2017.
27. YUNIAHASTUTI T I, ANSHORI I, ROBANDI I. Load Frequency Control (LFC) of Micro-hydro Power Plant with Capacitive Energy Storage (CES) using Bat Algorithm (BA). 2016 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication.
28. SEBASTIÁN R, PEÑA A R. "Simulation of an isolated Wind Diesel System with battery energy storage", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011, 81, pp. 677–686.
29. SEBASTIÁN R. "Application of a battery energy storage for frequency regulation and peak shaving in a wind diesel power system", *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2016,10 (3), 764-770, ISSN:1751-8695.
30. GUO B, BACHA S, ALAMIR M, IMANEIN H. "An anti-disturbance ADRC based MPTT for variable speed micro-hydropower station". In: IEEE, editor. *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*; 2017 29 Oct.-1 Nov. 2017 Beijing, China IEEE; 2017. pp. 1783-1789.
31. BELHADJI L, BACHA S, ROYE D, REKIOUA T. Experimental Validation of Direct Power Control of Variable Speed Micro-Hydropower Plant. In: IEEE,

- ed. *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. 25-28 Oct. 2012, Montreal, 2012.
32. ALI W, FAROOQ H, REHMAN A U, FARRAG M E. Modeling and performance analysis of micro-hydro generation controls considering power system stability. *2017 First International Conference on Latest trends in Electrical Engineering and Computing Technologies (INTELLECT)*: IEEE 2017, p. 1-7.
33. DOOLLA A) S, BHATTI T S. "Load Frequency Control of an Isolated Small-Hydro Power Plant With Reduced dump Load", *IEEE Transaction on Power Systems*. 2006, 21 (4), 1912.
34. DOOLLA B) S, BHATTI T S. "Automatic Frequency Control of an Isolated Small Hydro Power Plant", *International Energy Journal*. 2006, 7(1), p. 17-26.
35. VILAS K S, AKOLKAR S M. "Load Frequency Control of Micro Hydro Power Plant using Fuzzy Logic Controller". In: IEEE, ed. *IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI-2017)*. 2017.
36. BORY P H, MARTÍNEZ G H, VÁZQUEZ S L, CHANG M F, ENRÍQUEZ G L A. "Comparison of Three-Phase Rectifier with Symmetrical Switching and AC-AC Converter for the Power Factor Improvement in Hydroelectric Micro-Plants", *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 2018, 101-111, pp. 101-111
37. YADAV R K, MATHEW L. "Load Frequency control of an Isolated Small Hydro Power Plant with Reduction in Dump Load Rating By Using Variable Structure Control", *International Journal of Engineering Science Invention*. 2014,3 (5), 8-15, 8, ISSN:2319-6734.
38. PEÑA P L, FONG B J, DOMÍNGUEZ A H, CHANG M F, GARCÍA-ALZORRIZ P. J. A, TOLEDANO I M. "Regulación de frecuencia de una Minihidroeléctrica por carga secundaria utilizando un PC embebido de uso industrial". In: Oriente U d, ed. *Conferencia Científica Internacional ELECTRICA' 2004* Universidad de Oriente. Santiago de Cuba. 14-16 de julio del 2004. ISBN 959-11-0452-9. 2004.
39. PEÑA P L, DOMINGUEZ A H, FONG B J, GARCIA-ALZÓRRIS P J A. "Regulación de frecuencia en una Minihidroeléctrica por carga lastre mediante un pc Embebido". 9th Spanish Portuguese Congress on Electrical

- Engineering (9CHLIE); 2005; Marbella, España. 30/6 -2/7 de 2005: Book of Summaries, pp 151-152.
40. DOMÍNGUEZ A H. "Modelado y simulación para el análisis y diseño de algoritmos de control de una pequeña unidad hidroeléctrica". Tesis presentada en opción al título de Máster en Control Automático: Universidad de Oriente. 1999.
41. DOMÍNGUEZ H, ARAFET P, CHANG F, PEÑA L. "Fuzzy Switched Mode Control for a Linearized Plant subjected to impulsive load disturbances". XI Congreso Latinoamericano de Control Automático. 2004; Ciudad de la Habana. Cuba: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría. CUJAE, 2004.
42. DOMÍNGUEZ H, FONG B J. "Control Robusto de la frecuencia de una pequeña unidad hidroeléctrica en operación aislada", *Revista Energía y Computación*, 2003, 11(1), pp. 11-18.
43. PEÑA P L, DOMINGUEZ H, FONG J, GARCIA-ALZÓRRIS P J A. "Regulación de frecuencia en una Minihidroeléctrica por carga lastre mediante un pc Embebido". 9th Spanish Portuguese Congress on Electrical Engineering (9CHLIE), 2005, pp 151-152.