



TRABAJO TEÓRICOEXPERIMENTAL

Mejoras en la eficiencia energética de las mini-hidroeléctricas aisladas mediante la regulación combinada flujo-carga lastre

Improvements of the energy efficiency in isolated micro-hydropower by means of the combined flow-dump load regulation


Leonardo Peña Pupo¹; Ernesto Yoel Fariñas Wong^{2,*}

¹Empresa de Hidroenergía UEB, Santiago de Cuba, Cuba.

² Universidad Central “Martha Abreu” de las Villas, UCLV, Cuba.

*Autor de correspondencia: farinas@uclv.edu.cu

Recibido: 4 de septiembre de 2019 Aprobado: 28 de noviembre de 2019

Licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional 

RESUMEN/ABSTRACT

Esta investigación propone un esquema de regulación de frecuencia combinando el control de una carga resistiva secundaria mínima y el flujo de turbinas Pelton en régimen autónomo. Se identifican los antecedentes de regulación de frecuencia por carga y por flujo, así como su posible combinación para mejorar la eficiencia energética de centrales hidroeléctricas autónomas. Se caracteriza el tema en el contexto cubano y se evalúa la combinación de ambos métodos, mediante un estudio de caso. Fueron procesados los resultados de simulación del método empleando Matlab®/Simulink, a partir de modelos obtenidos en investigaciones previas; contra otros reportados en la literatura. Los resultados de simulación del esquema propuesto mostraron la posibilidad de elevar la eficiencia energética de las mini-hidroeléctricas autónomas. El esquema propuesto fue validado mediante simulación, cumpliendo con la norma cubana NC62-04, reduciendo la carga lastre resistiva a un 6% del valor de potencia nominal del generador.

Palabras clave: hidroenergía aislada, eficiencia energética, regulación de frecuencia.

The existing combined regulation methods do not lead to efficient management of water in isolated hydraulic turbines; these do not prioritize the minimization of the value of the resistive dump load. In this paper, a frequency regulation scheme was proposed that combines a minimum dump resistive load and the flow of the Pelton turbines that operate autonomously. At the beginning on this paper was identified the state of the art of autonomous isolated hydro. Also was characterized in Cuban context and the possibilities of dump load and flow controls methods. Finally was evaluated the combination of this two methods due to a generalized Cuban study case. The simulation results of the method in Matlab®/Simulink was processed through a case study, from models obtained in previous investigations, contrasted with benchmark reported in the literature. With this scheme it was possible to increase the energy efficiency of autonomous mini-hydroelectric plants. Through simulation the proposed scheme was validated in a way that complies with Cuban standard NC62-04, with a reduction of the resistive dump load at 6% of the generator nominal power value.

Key words: isolated hydropower generation, energy efficiency, frequency control.

INTRODUCCIÓN

Una alternativa importante para disminuir la brecha entre la oferta y la demanda de energía eléctrica a nivel mundial, así como atenuar los efectos del cambio climático, es a través del uso del potencial energético del caudal de agua de pequeños ríos mediante mini y micro centrales hidroeléctricas. Las centrales hidroeléctricas se clasifican en general como a pie de presa y de pasada, o también conocidas como a filo de agua [1].

Cómo citar este artículo:

Leonardo Peña Pupo y Ernesto Fariñas Wong. Mejoras en la eficiencia energética de las mini-hidroeléctricas aisladas mediante la regulación combinada flujo-carga lastre. 2019. vol. 41, n.1, enero/abril. ISSN: 1815-5901.

Sitio de la revista: <http://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE>

Estas centrales 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: aisladas de la red y como fuente única de energía [2]. Desde el punto de vista económico, los costos de las soluciones técnicas y tecnológicas para mantenerlas operando en los estándares internacionales se contraponen al elevado beneficio social de estas plantas; debido principalmente a la fuerte economía de escala que caracteriza la Hidroenergía [1, 3]. Este inconveniente se agudiza si se tiene en consideración que, por lo general, las mini y micro centrales hidroeléctricas se emplean en comunidades rurales cuyos habitantes suelen ser de bajos ingresos.

A nivel internacional no existe un consenso respecto a la clasificación de estas centrales en función de la potencia instalada. En Cuba se clasifican como mini centrales hidroeléctricas aquellas cuya potencia instalada oscila entre 51 kW y 500 kW; así mismo se denominan micro centrales para potencias en el rango 1-50 kW según la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). Cuba cuenta con 144 centrales hidroeléctricas en funcionamiento, 107 de las cuales se encuentran en regiones montañosas, aisladas del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) [4]. Lo anterior permite el suministro de energía a miles de personas, además de objetivos sociales y económicos. 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 [4], lo que implica muy baja calidad de la energía según las normas jurídicas (Ley 1287/1975) y técnicas, como consecuencia no incentiva el consumo de energía. El mecanismo de regulación de frecuencia de estas 6 centrales es mediante carga secundaria resistiva [4]. La regulación por carga secundaria resistiva, a pesar de ser la más empleada en las centrales aisladas, tiene el inconveniente de ser poco eficiente en cuanto al uso del portador energético al disipar energía eléctrica en forma de calor.

La regulación por flujo utiliza más eficientemente el recurso; aunque la respuesta temporal es más lenta, además, su diseño requiere mayor grado de precisión al considerar los transitorios hidráulicos y sus efectos negativos como el conocido golpe de ariete. La combinación de las ventajas de estos dos métodos, a juicio de los autores de este trabajo, podría ser una vía de lograr índices de desempeño técnico acertados, con costos bajos y alta eficiencia energética. El objetivo de esta investigación es proponer una vía de aprovechar más eficientemente el portador energético garantizando que la electricidad producida en las centrales autónomas cumpla con los estándares de calidad requeridos; a través de la combinación de la regulación por carga secundaria y la regulación por flujo.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Las mini y micro centrales hidroeléctricas de Cuba a menudo presentan problemas de operación, las principales causas son: pobre control de la frecuencia y la potencia, así como deficiente distribución de la demanda. 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 [4], entre otros factores. Todos estos aspectos propician baja calidad de la energía y una baja eficiencia energética, que trae como consecuencia que los hidrogrupos operen fuera de su punto de operación óptimo. A continuación, puede verificarse este hecho en la figura 1, con el comportamiento de la frecuencia eléctrica generada por una micro hidroeléctrica aislada en un día típico.

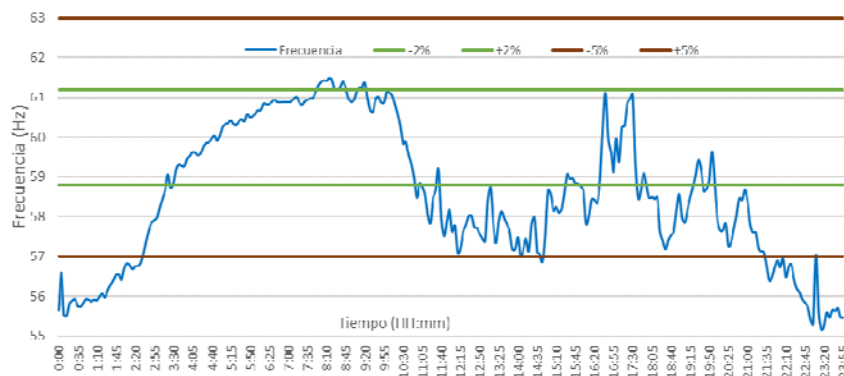


Fig. 1. Comportamiento típico de la frecuencia de una mini-hidroeléctrica sin regulación. Fuente: (Autores, 2019)

Como se aprecia en la figura 1, el valor de la frecuencia eléctrica generada en esta central hidroeléctrica aislada oscila fuera del rango de variación permisible de $\pm 1\%$ (± 0.6 Hz) según la norma cubana del SEN NC62-04. La norma aplica para el sistema electro-energético de todo el territorio nacional, incluyendo los sistemas conectados, o aislados de la red central. No existen referencias de vigencia sobre una norma, cubana o internacional, que delimite las variaciones permisibles en las variables eléctricas para los sistemas autónomos en particular. Por las dimensiones de la red, las demandas energéticas a un sistema eléctrico de gran potencia representan un valor porcentual pequeño respecto a un sistema autónomo de baja potencia, como las hidroeléctricas objeto de esta investigación. Por esta razón no deberían tener igual requerimiento técnico respecto a su comportamiento dinámico y de calidad.

En el caso de sistemas de pequeña potencia aislados del SEN, a falta de una norma específica, algunas investigaciones suelen considerar que los valores nominales de frecuencia son correctos si se encuentran en el rango de $\pm 2\%$ en un minuto y $\pm 5\%$ instantáneo [5]. Para mantener las centrales hidroeléctricas operando en sus valores nominales, se reportan varios enfoques en la literatura especializada, algunos de los cuales consideran el empleo de los sistemas de almacenamiento en energía mecánica a través de volantes de inercia [6], sistemas interconectados [7], empleo de micro redes [8] y almacenamiento de energía eléctrica [9]. Otros métodos, consideran el empleo de generadores asincrónicos [10] y las micro redes aisladas [11]. Algunas de estas soluciones no contemplan los sistemas autónomos, por lo que no son tomadas en consideración en el esquema que se propone en este trabajo. En el caso más general, la micro-red de corriente alterna integra el aporte energético de varias fuentes, en las que es imprescindible para su sincronización la igualdad de frecuencias, tensiones y fases.

Desde el punto de vista de la operación de mini y micro-centrales hidroeléctricas autónomas, se conocen dos formas de regular la frecuencia eléctrica generada: manipulando el caudal de agua que ingresa a la turbina o ajustando la carga del generador [12]. El primer método persigue ajustar el punto de operación de la turbina, regulando el flujo de agua que ingresa a la entrada de la turbina. El 90% de las minis y micro hidroeléctricas de Cuba operan con turbinas Pelton de modelos TP-15 y TP-16. Estas tienen capacidades de regulación de frecuencia limitadas, debido a los altos costos de los reguladores de velocidad comerciales y a los efectos de la inercia del agua resultado del circuito hidráulico de carga alta, así como el gran valor del tiempo de apertura de los inyectores; adoptado para evitar problemas de presión transitoria en la compuerta [7].

El segundo método, basado en el empleo de una carga secundaria resistiva, procura que la turbina trabaje en un punto de operación fijo: a potencia máxima, equilibrando la carga que representa la demanda de los usuarios con una carga secundaria resistiva conectada en paralelo [13]. Este método de regulación tiene un diseño más sencillo y buen desempeño frente a perturbaciones impulsivas y sostenidas; sin embargo en los diseños clásicos, la potencia nominal de la carga secundaria se elige un 30% más alta que la potencia nominal [14]. En este caso, se demuestra que es rentable sólo cuando se requiere agua caliente para otros usos [15, 16]. Otro relativo inconveniente está relacionado con la presencia de armónicos causados por la conmutación del rectificador controlado, lo cual es soluble aplicando técnicas de filtrado y conmutación [17]. Algunas investigaciones sugieren igualar la potencia secundaria a la nominal de la planta [18], pero a un costo elevado [19]. Otros autores [14, 15, 19] plantean la reducción de la carga secundaria a un 50% de la potencia nominal a través del ajuste del flujo de la turbina. En investigaciones precedentes, se diseñó un regulador por carga, con un valor nominal de la carga secundaria del 30%, obteniéndose buen desempeño solo frente a perturbaciones sostenidas de pequeña amplitud.

Mediante un regulador mixto electrónico, Kurtz (2006) propone una reducción de la carga secundaria a un 10% de la potencia nominal [20]. En este, a juicio de los propios autores, se emplean reglas empíricas, no se realiza un estudio de cargas, ni se evalúan los tipos de perturbaciones más frecuentes. Por otra parte, en los trabajos de Doolla (2006), se propone un esquema de regulación mixto: el control del flujo se realiza mediante válvulas *on-off* que aumentan o disminuyen, de forma instantánea, el flujo de entrada a la turbina en valores prefijados de un 30% o 50% [14, 15]. En estos trabajos la frecuencia se mantiene según los parámetros diseñados para perturbaciones sostenidas de un 2,4% de la potencia nominal. En [21], se propone un regulador mixto carga-flujo, combinando un regulador PI para la carga y una *fuzzy* para regular el flujo, realimentando la medición de la frecuencia. En este se diseña el *firmware* y *hardware* basado en un micro controlador. La citada investigación [21], no plantea como objetivo minimizar la carga secundaria, no refiere el cumplimiento de las normas respecto a las variaciones de frecuencia permitidas y el diseño de los reguladores; tampoco describe cómo realiza el cambio del punto de operación cuando las perturbaciones de carga superan la potencia máxima instalada en la carga secundaria. Estos elementos indican que el diseño de Fong (2018) [21], no está orientado al uso eficiente del recurso energético primario. Kumar (2016) presenta una revisión de los últimos 20 artículos publicados en el área del control por carga [13], y refiere 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 consideran 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, de forma que se compensen las fluctuaciones de la demanda gracias a la rapidez del control por carga, e inmediatamente a través del control por flujo; de forma más suave se ajuste el punto de operación de la turbina al valor de potencia demandado. Con este nuevo método se podría operar cercano a la demanda en lugar de operar a máxima potencia. Como resultado, se suministraría energía según los estándares de calidad normados y se aprovecharía más eficientemente el portador energético al reducirse considerablemente la potencia de la carga secundaria. El valor de la carga secundaria estaría en función de los requerimientos de calidad deseados, y no en función de la potencia nominal instalada; lo que propiciaría beneficios económicos al bajar los costos del equipamiento e incrementar el uso del portador energético.

MATERIALES Y MÉTODOS

A través de la revisión bibliográfica se identifican los antecedentes de la regulación de frecuencia por carga y por flujo, así como su posible combinación para mejorar la eficiencia energética de mini y micro centrales hidroeléctricas autónomas. De igual forma se caracteriza el contexto actual del tema en Cuba y algunos requerimientos técnicos indispensables.

En este acápite se evalúa la combinación de ambos métodos mediante un estudio de caso representativo del total de instalaciones autónomas cubanas. Por último, se realiza una evaluación del comportamiento dinámico de la planta mediante simulación a través del software Matlab®/Simulink; en que se emplearon modelos de referencia para este tipo de centrales [12].

ESQUEMA PROPUESTO

La potencia instalada de una central hidroeléctrica se determina mediante la ecuación (1). El punto de operación en que opera la turbina depende de los valores de: carga hidráulica (H), flujo que circula por la turbina (Q) y eficiencia de la turbina en el punto nominal de operación (η). Puede ser ajustado a través de la apertura de los álabes directrices con lo que variará el flujo de admisión a la turbina y la eficiencia, considerando que la carga hidráulica permanece constante.

$$P = 9.81 \cdot \gamma \cdot Q \cdot H \cdot \eta \quad [W] \quad (1)$$

Donde: γ : Peso específico del agua $\gamma = 1000 \text{ kg} / \text{m}^3$

Los valores de eficiencia de la turbina se obtienen a través de la curva característica del modelo de turbina semejante, según la teoría de semejanza de turbo máquinas. El modelo de turbina semejante se corresponde con la turbina Pelton TP15 del fabricante cubano “Planta Mecánica”, cuyo número específico de revoluciones es 15 rpm y puede alcanzar una potencia máxima de 160 kW.

Para el ajuste del punto de operación de la turbina, a través de la combinación flujo-carga, se propone el esquema de regulación que se muestra en la figura 2.

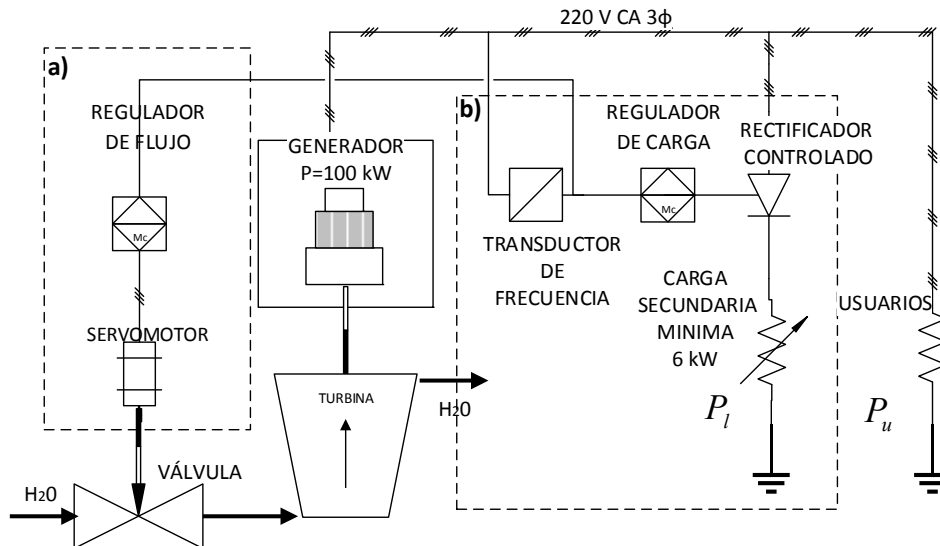


Fig. 2. Esquema de regulación combinado de micro-hidroeléctricas autónomas. a) Regulación por flujo, b) Regulación por carga. Fuente: (Autores, 2019)

El esquema consta de un lazo de regulación por flujo (figura 2.a). El flujo a la entrada de la turbina se ajusta al valor deseado mediante un servomotor que mueve el vástago del inyector de la turbina en un rango limitado [$0 \leq \Delta l \leq 21 \text{ mm}$] con comportamiento integral, en función del valor de la frecuencia medida en los bornes del generador. El lazo de control por carga secundaria (figura 2.b), mantiene constante la potencia del generador, ajustando la potencia consumida en la carga secundaria resistiva, gobernada por el puente rectificador trifásico controlado. El valor modular del cambio en la carga secundaria es igual a la variación de potencia causada por los usuarios, pero en sentido contrario. Toda vez que el punto de operación de la turbina lo define el nivel de carga demandado por los usuarios (P_u) y el control por carga consiste en balancear el aumento o disminución de ésta a través de la carga secundaria (P_l). El ajuste del punto de operación queda definido por la ecuación (2):

$$\Delta P = \Delta P_u + \Delta P_{l_m\acute{a}x} \quad (2)$$

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

$$f(P_u) = \begin{cases} \text{No Ajuste} \rightarrow \text{si } |\Delta P_u| \leq |\Delta P_{l_m\acute{a}x}| \\ \text{Ajuste} \rightarrow \text{si } |\Delta P_u| > |\Delta P_{l_m\acute{a}x}| \end{cases}$$

La magnitud del ajuste y el valor mínimo de la potencia de la carga secundaria resistiva dependen del comportamiento que se desee del esquema combinado. En este caso, se diseña para obtener un error a régimen estacionario (e_{ss}) de $\pm 1\%$ ($\pm 0,6$ Hz), tiempo de establecimiento (t_s) menor de 60 s, máximo sobrepaso (m_p) del error de $\pm 1,5$ Hz, de acuerdo con lo que establece la norma cubana NC62-04 [5]. Para el caso de estudio que se analiza se logra reducir la carga secundaria a un 6% de la potencia nominal como resultado de la acción combinada.

MODELO EN FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

El modelo en funciones de transferencia del esquema para el ajuste del punto de operación combinado flujo-carga se muestra en la figura 3. Se emplea un regulador Proporcional Integral (PI) para regular la carga y otro Proporcional Derivativo (PD) para el flujo. El modelo de la planta considerado corresponde a una mini-central hidroeléctrica de 100 kW, los parámetros del modelo se corresponden con los modelos analíticos determinados por Kundur (1994) [12]. Los valores de los parámetros del modelo son determinados a través de identificación experimental y fueron comprobados en trabajos previos [5].

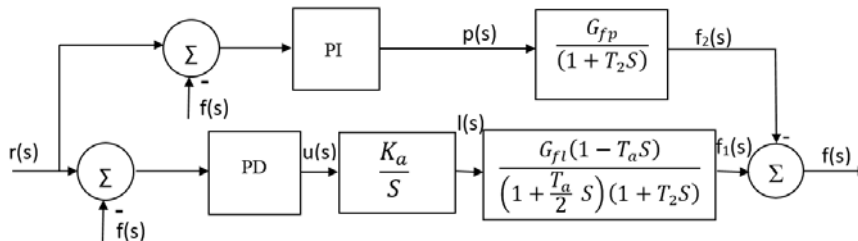


Fig. 3. Diagrama de bloques del sistema de control combinado. Fuente: (Autores, 2019)

Los valores del modelo considerado en el estudio de caso son: $G_{fl} = 2,0$ Hz/mm; $T_a = 0,4$ s; $T_2 = 6,0$ s; $G_{fp} = 1,8$ Hz/kW; $K_a = 0,05$ mm/V; $[-3 \text{ kW} \leq P_l \leq 3 \text{ kW}]$; $[0 \leq \Delta l \leq 21 \text{ mm}]$. La constante T_a es determinante en el comportamiento dinámico del hidrogupo. Esta constante se conoce como constante de tiempo hidráulica. El rango de variación típico es $[0,5 \leq T_a \leq 4 \text{ s}]$ a plena carga y cambia con el punto de operación [12]. Para las mini y micro centrales hidroeléctricas con turbinas Pelton TP-15 el rango de variación típico comprobado experimentalmente por los autores es de $[0,4 \leq T_a \leq 0,6 \text{ s}]$, con lo que podría considerarse constante en este y otros análisis. Es una constante muy importante en el diseño de centrales hidráulicas y para turbinas de reacción se toma en consideración además, el aporte de la cámara espiral de las turbina [22]. 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 [12]: presencia de un cero en el semiplano derecho (figura 3). Esta característica, unida a las restricciones del tiempo de cierre de los elementos de admisión, hace que el regulador PD del esquema propuesto deba ser adecuadamente diseñado para evitar el fenómeno del golpe de ariete.

Ajuste de los reguladores de carga y flujo

El ajuste de los dos reguladores (flujo y carga) se realiza de forma independiente a través del método de asignación de polos, asegurando que el comportamiento deseado de la frecuencia cumpla con la norma cubana NC62-04. Tomando en consideración 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; pues la constante de tiempo depende de elementos electrónicos y se desea obtener error cero a estado estacionario en el comportamiento de la frecuencia, se diseña un regulador proporcional integral (PI). Este regulador es el que debe rechazar las perturbaciones de carga de gran magnitud, por esta razón se le exige un t_s de 4 a 6 veces menor que el de flujo, $e_{ss} \leq 1\%$ y $m_p \leq 1 \text{ Hz}$.

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 3. Puede comprobarse que el regulador PD de flujo resulta según la ecuación (3).

$$G_{cf}(s) = K_a K_p \left(\frac{1}{s} + T_d K_p \right) \quad (3)$$

Toda vez que este regulador actúa sólo cuando $|\Delta P_u| > |\Delta P_{l\text{ máx}}|$, las restricciones temporales para el regulador por flujo son menores al de carga y se corresponden con los límites establecidos en la norma NC62-04.

Se determinan los valores de la constante de acción proporcional (K_p), constante de tiempo de acción integral (T_i), y constante de tiempo de acción derivativa (T_d) según sea el caso; tales que los polos dominantes $p_{(1,2)} = (-\delta \pm j\omega_d)$ de la función de transferencia a lazo cerrado, produzcan un comportamiento similar al de un polinomio de segundo orden (**ecuación 4**) para el regulador por carga y de tercer orden ecuación (5) para el regulador por flujo, como se muestra a continuación:

$$P_{d2}(s) = s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 \quad (4) \quad P_{d3}(s) = (s + 20\delta)(s^2 + 2\delta s + \delta^2 + \omega_d^2) \quad (5)$$

Los polos están relacionados con el factor de amortiguamiento (ξ), tiempo de establecimiento (t_s) y máximo sobrepaso (m_p) para un sistema sub-amortiguado ($\xi < 1$). Igualando el polinomio característico de la función de transferencia a lazo cerrado ($1 + G_{cc} G_{pc}$) para el regulador por carga y ($1 + G_{cf} G_{pf}$) para el regulador por flujo, con el polinomio deseado correspondiente, se obtienen las expresiones de las constantes de tiempo del regulador PI y el regulador PD mostradas en la tabla 1.

La tabla 1, muestra para cada regulador: el resumen de los valores de los polos complejos conjugados de acuerdo a la respuesta temporal deseada, las expresiones de cálculo de las constantes de tiempo del regulador, así como los valores correspondientes de las constantes de tiempo.

Tabla 1. Resumen de los valores de ajuste de los reguladores y polos dominantes. Fuente: (Autores, 2019)

Tipo de Regulador	Polos deseados ($-\delta \pm j\omega_d$)	Expresiones de cálculo			Valores		
		K_p	T_i	T_d	K_p	T_i	T_d
Carga	$-0,46 \pm 0,79j$	$K_p = \frac{(2\xi\omega_n T_2 - 1)}{K_{af}}$	$T_i = \frac{K_{af} K_p}{T_2 \omega_n}$	-	5,6	4,14	0
Flujo	$-0,92 \pm 1,28j$	$K_p = \frac{10T_a T_2 \delta (\delta^2 + \omega_d^2)}{K_a G_{fl}}$	-	$T_d = \frac{T_a + T_2 - 22\delta}{T_a G_{fl}}$	1,37	0	2,81

Dadas las posibilidades que brinda la simulación con Matlab®/Simulink, la ubicación final de los polos dominantes y el cálculo de los parámetros de ajuste de los reguladores, fueron refinados mediante el método de prueba y error. Por esta razón, los valores mostrados en la tabla 1, no son exactamente resultado de las ecuaciones, sino que presentan pequeñas variaciones de alrededor de un 5% de error.

Tipos y magnitudes de las perturbaciones

Según los estudios de carga realizados [6, 14], las perturbaciones de carga impulsivas están asociadas con los equipos que por su naturaleza demandan un alto consumo eléctrico en un intervalo de tiempo corto: soldaduras por arco eléctrico o arranque de motores en las mini industrias existentes. La mayoría de las cargas de los equipos electrodomésticos, así como la iluminación se consideran cargas sostenidas y como tal se modelan en este trabajo.

Las magnitudes de las perturbaciones se diseñan a partir del análisis del comportamiento de las cargas, obtenido de estudios previos [6, 14]. A partir de estos, es relevante el análisis de la respuesta temporal de la frecuencia eléctrica para los casos siguientes:

1. Cuando varía la amplitud y duración de las perturbaciones de carga impulsivas de entre 2-3 s
2. Cuando la potencia requerida por los usuarios no supera la carga secundaria $|\Delta P_u| \leq |\Delta P_{l \text{ máx}}|$.
3. Cuando la potencia requerida por los usuarios supera la carga secundaria $|\Delta P_u| > |\Delta P_{l \text{ máx}}|$.
4. Cuando varía la amplitud de las perturbaciones sostenidas de hasta un 15,5 % respecto a la potencia del generador.

La tabla 2, muestra los tipos, magnitudes y tiempo en que actúan las perturbaciones simuladas.

Tabla 2. Tipos y magnitudes de las perturbaciones simuladas. Fuente: (Autores, 2019)

Casos	Tipo de Perturbación	Amplitud [kW]	Duración [s]	$\frac{P_u}{P_T}$ [%]	$\Delta P_{l \text{ máx}}$ [kW]
Caso 1	Impulso	5	2	11	± 3
Caso 2	Impulso	5	3	11	± 3
Caso 3	Escalón	3/6	-	6.6 / 13.3	± 3
Caso 4	Escalón	3/7	-	6.6 / 15.5	± 3

De acuerdo a la naturaleza de las cargas que habitualmente están presentes en estos sistemas de generación de energía aislados, se simula el comportamiento dinámico ante perturbaciones del tipo impulsivas de gran amplitud y corta duración (tabla 1, casos 1 y 2), así como del tipo sostenidas de pequeña amplitud en relación a la potencia del generador (caso 3). Se simula, además, el comportamiento dinámico ante perturbaciones sostenidas de hasta un 15,5% (caso 4).

RESULTADOS y DISCUSIÓN

Resultados para cargas impulsivas. Casos 1 y 2

La figura 4, muestra el comportamiento de la frecuencia de la tensión generada ante un cambio de carga del tipo impulsiva. En la figura 4.a), se presenta la respuesta con los reguladores de carga y flujo actuando de forma independiente; así como, la figura 4.b), muestra el comportamiento de la frecuencia cuando actúa el regulador combinado flujo-carga. Con magnitudes de perturbación del tipo impulsiva de hasta un 11% de la potencia nominal (casos 1 y 2), el regulador por carga logra estabilizar la frecuencia en 3 s; podría considerarse casi instantáneo si se compara con los 60 s del regulador por flujo. Por encima del 11% las variaciones de frecuencia son mayores de 1 Hz por lo que estarían fuera de la norma considerada. La rapidez del regulador por carga hace que para los casos 1 y 2 domine su respuesta en la acción combinada; sin embargo, desde la perspectiva del uso racional de la energía, es un método poco eficiente cuanto mayor sea el valor de la carga secundaria instalada.

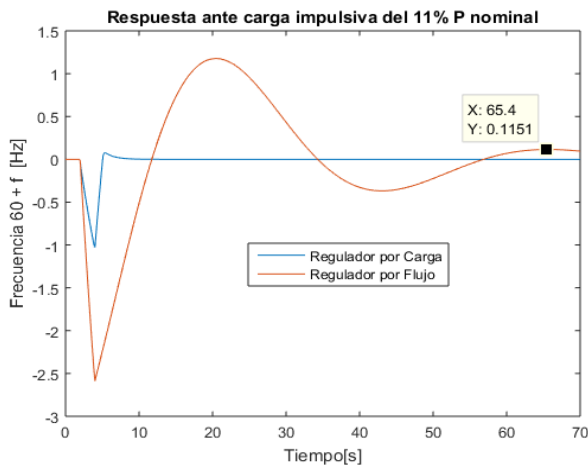


Fig. 4.a) Respuesta ante carga impulsiva del 11%. Reguladores por flujo y carga independientes. Fuente: (Autores, 2019)

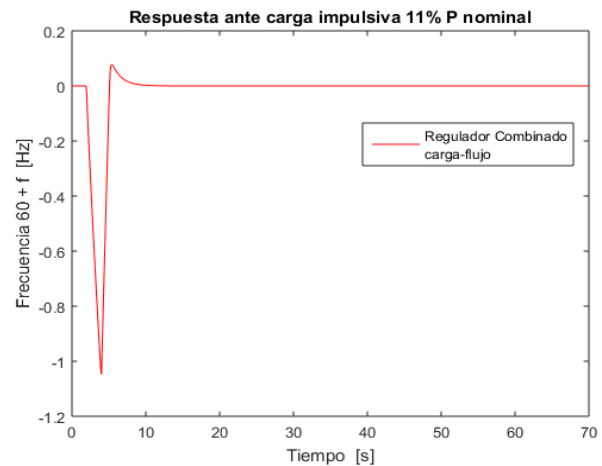


Fig. 4.b) Respuesta ante carga impulsiva del 11%. Regulador combinado. Fuente: (Autores, 2019)

Resultados para cargas sostenidas. Casos 3 y 4

Para perturbaciones del tipo sostenidas de hasta un 10% de amplitud, la frecuencia se comporta dentro de los límites permitidos como se muestra en la figura 5.a), sólo para la regulación combinada flujo-carga. Con la regulación por flujo, ante perturbaciones de hasta un 10% de la potencia nominal, la frecuencia converge a su valor deseado pero las variaciones de esta son mayores (figura 5.a)) que las admitidas en la norma citada. La regulación por carga por sí sola, no es capaz de compensar las perturbaciones cuya magnitud sea mayor que ± 3 kW; conclusión que se deriva de la ecuación (2).

Nótese que el tiempo de establecimiento es menor (25 s) mediante la regulación combinada (figura 5.a), y el máximo sobrepaso es menor de 1,8 Hz (3 %). El comportamiento experimentado confirma la hipótesis de la posibilidad de obtención de una respuesta temporal según lo establecido en las normas, sólo a través de la reducción de la carga secundaria y la combinación de los esquemas de flujo y carga. Cuando la amplitud de la perturbación es del 12% como se muestra en la figura 5.a), el tiempo de establecimiento permanece inalterable, sin embargo el sobrepaso aumenta a un 5% (3 Hz) lo cual está fuera de la norma cubana establecida. Realizar un análisis sobre los rangos de validez de la norma NC62-04 podría resultar de utilidad, para las centrales objeto de estudio. En el orden práctico, y a falta de una norma específica para los sistemas autónomos de baja potencia, la Empresa de Hidroenergía de Cuba suele considerar de forma empírica, que los valores nominales de frecuencia son correctos si se encuentran en el rango de $\pm 2\%$ en un minuto y $\pm 5\%$ instantáneo.

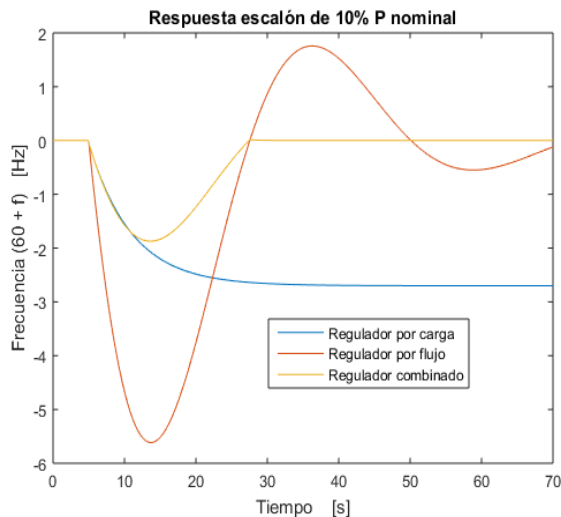


Fig. 5.a) Comportamiento de la frecuencia para los tipos de reguladores ante cargas sostenidas de un 10%.
Fuente: (Autores, 2019)

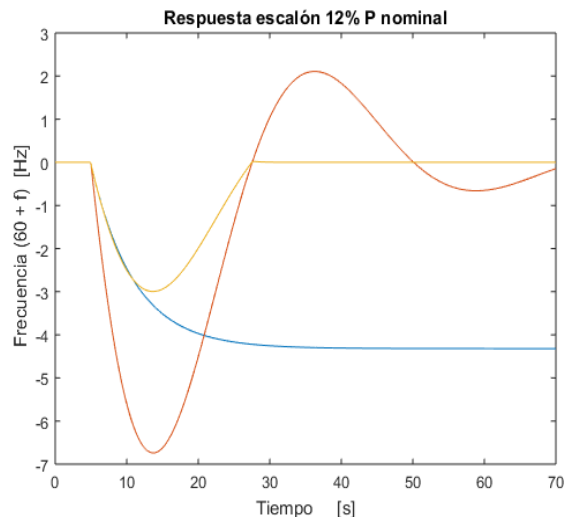


Fig. 5.b) Comportamiento de la frecuencia para los tipos de reguladores ante cargas sostenidas de un 12%.
Fuente: (Autores, 2019)

Desplazamiento del vástago de la válvula de la turbina.

Cuando se combinan los esquemas de carga y flujo, el desplazamiento del vástago de la válvula de admisión de la turbina, ante perturbaciones del tipo impulsivas (casos 1 y 2), se reduce considerablemente como muestra la figura 6.a). Si se compara con la regulación por flujo (color azul), la acción combinada (color rojo) reduce el tiempo de establecimiento y el sobrepaso en 4 y 3,2 veces respectivamente (figura 6.a) y 6.b)). Para perturbaciones de carga sostenidas (casos 3 y 4), la pendiente con que se realiza el desplazamiento de la válvula es menor, lo que propicia una acción más “suave” y físicamente realizable. Esto contribuye a evitar los cierres bruscos y sus consecuencias indeseables.

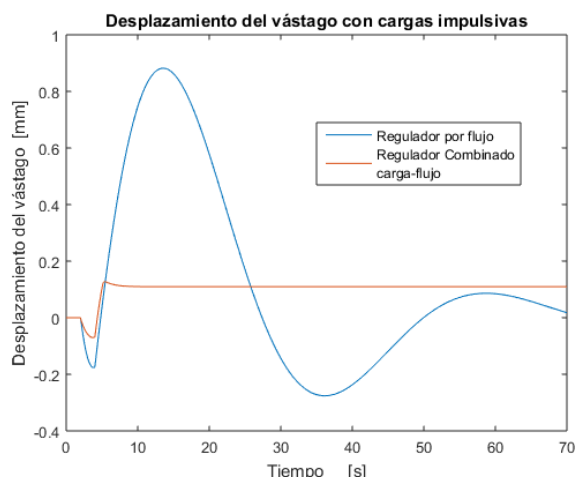


Fig. 6.a) Desplazamiento del vástago de la válvula de la turbina para cargas impulsivas. Fuente: (Autores, 2019)

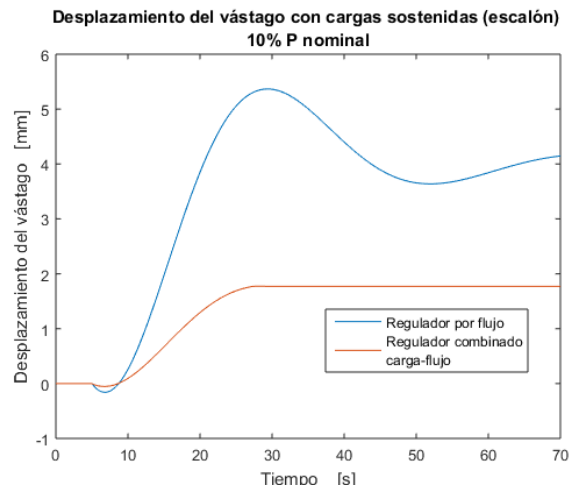


Fig. 6.b) Desplazamiento del vástago de la válvula de la turbina para cargas sostenidas. Fuente: (Autores, 2019)

Las simulaciones realizadas muestran que las soluciones óptimas para las mini y micro centrales hidroeléctricas autónomas, constituyen un desafío para lograr buenos resultados de desempeño, con bajos costos y alta eficiencia energética. La minimización de la carga secundaria resistiva mediante el método combinado flujo-carga secundaria, es el primer paso para aumentar la eficiencia energética de estas centrales con costos bajos. En trabajos futuros, los autores de esta investigación abordarán otras vías como: sustitución de la carga secundaria resistiva por iluminación, corrección de voltaje, o en algún tipo de almacenamiento energético.

CONCLUSIONES

Los resultados de simulación realizados en esta investigación muestran que con el esquema combinado flujo-carga lastre propuesto, es posible aumentar la eficiencia energética en las mini y micro-centrales hidroeléctricas autónomas al reducir hasta un 6% el valor de la carga secundaria resistiva. Con la combinación adecuada flujo-carga, se aprovechan más eficientemente las ventajas de rapidez del control por carga y el seguimiento de la demanda del control por flujo, lográndose rechazar perturbaciones de carga del tipo impulsivas y sostenidas de hasta un 10% sin perjuicio de la calidad de la energía generada. A partir de garantizar la generación de energía con la calidad que establece la norma NC62-04, aumenta el aprovechamiento del portador energético en las mini y micro centrales hidroeléctricas, lo que pudiera mejorar la factibilidad de construcción de nuevas plantas y la rentabilidad de las existentes. La norma NC62-04, que considera en igualdad de condiciones las centrales conectadas y las aisladas, podría permitir eventuales variaciones de frecuencia en centrales hidroeléctricas autónomas de hasta un 2% sin deteriorar los requerimientos de control. En trabajos futuros, los autores de esta investigación abordarán la sustitución de la carga secundaria resistiva por otros métodos que utilicen más racionalmente el portador energético.

REFERENCIAS

- [1] IHA. "Hydropower Status Report 2017". International Hydropower Association; 2017 December 2017. Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=2ahUKEwih_repl6HmAhVlrkKHWjMCR0QFjABegQIDBAE&url=https%3A%2F%2Fwww.hydropower.org%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fpublications-docs%2F2017%2520Hydropower%2520Status%2520Report.pdf&usq=AOvVaw3o-YJ5pc8x-FEYCATmghwZ
- [2] 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, v. 2, n. 9, ISSN:ISSN (PRINT): 2393-8374, (ONLINE): 2394-0697. Disponible en: https://www.academia.edu/16501850/AUTONOMOUS_MICRO-HYDRO_POWER_SYSTEM_FOR_DISTRIBUTED_GENERATION_A_POWER_QUALITY_ANALYSIS
- [3] IEA. "World energy balances", *IEA World Energy Statistics and Balances* <http://dxdoiorg/101787/data-00512-en>, 2018
- [4] HIDROENERGÍA. "Estado de las Instalaciones actualizado 30-12-2018". Reporte Interno. Empresa de Hidroenergía: Unión Eléctrica; 2018. Disponible en: <https://webstore.iea.org/download/tableofcontents/1173>
- [5] DOMÍNGUEZ H, FONG B J. "Control Robusto de la frecuencia de una pequeña unidad hidroeléctrica en operación aislada", *Revista Energía y Computación*, 2003, v. 11, n. 1, p. 11-18. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/Control-robusto-de-la-frecuencia-de-una-peque%C3%B1a-en-Abreu-Barrios/77911b2b0cda75e741872f8ea50e84bc80a73314>

- [6] KHODADOOST A A A, *et al.* "Review of Flywheel Energy Storage Systems structures and applications in power systems and microgrids", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, v. 69, p. 9-18, DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.166>
- [7] DREIDY M, MOKHLIS H, MEKHILEF S. "Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017,v. 69, p. 144-155, DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.170>
- [8] 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. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8392089>
- [9] 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; 2016. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7873828>
- [10] GUO B, *et al.* "An anti-disturbance ADRC based MPPT 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. p. 1783-1789. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8216302>
- [11] ALI W, *et al.* "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. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8277626>
- [12] PRABHA KUNDUR. "Power System Stability and Control": The EPRI Power System Engineering Series. McGraw-Hill Inc 1994. Disponible en: <http://www.academia.edu/download/28284657/invitation.pdf>
- [13] KUMAR R. "Review and Analysis on Electronic Load Controller", *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES & MANAGEMENT*, 2017, v. 1, n. 2, p. 93-102. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/333748680_Review_On_Electronic_Load_Controller
- [14] DOOLLA S, BHATTI T S. "Load Frequency Control of an Isolated Small-Hydro Power Plant With Reduced dump Load", *IEEE Transaction on Power Systems*, 2006,v. 21, n. 4, p. 1912-1919. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/3267718_Load_Frequency_Control_of_an_Isolated_Small-Hydro_Power_Plant_With_Reduced_Dump_Load
- [15] DOOLLA S, BHATTI T S. "Automatic Frequency Control of an Isolated Small Hydro Power Plant", *International Energy Journal*, 2006,v. 7, n. 1, p. 17-26. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/268206113_Automatic_Frequency_Control_of_an_Isolated_Small_Hydro_Power_Plant
- [16] 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. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8392021>
- [17] BORY P H, *et al.* "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, v. 15, n. 1, p. 101-111, DOI:<https://doi.org/10.4995/riai.2017.8816>
- [18] VALAVI M, NYSVEEN A. "Variable-Speed Operation of Hydropower Plants: A look at the present, past and future", *IEEE Industry Applications Magazine*, 2018, v. 24, n. 5, p. 18-27. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8387741>
- [19] 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,v. 3, n. 5, p. 8-15, ISSN:2319-6734. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/d96f/e39f487eafd94c38ed6a329c4cc24972572b.pdf>
- [20] KURTZ V H, ANOCIBAR H R. "Sistema mixto para el control de la generación en micro centrales hidroeléctricas", *HIDRORED*, 2007, n. 1, p. 24-30, ISSN:0935-0578. Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwi-45ygoqHmAhXnw1kKH7YNB0sQFjAAegQIBhAC&url=https%3A%2F%2Faulavirtual.fio.unam.edu.ar%2Fpluginfile.php%2F7692%2Fmod_folder%2Fcontent%2F0%2FPublicaciones_VHKurtz%2FIn_Extenso_Mixto_.pdf%3Fforcedownload%3D1&usq=AOvVaw3t6vy5R66rS5LuZa5xT3Cm
- [21] FONG BARRIOS J, *et al.* "Design of a regulator of frequency for small central hydroelectric in isolated operation", *Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications*, 2018, Ed 13, v. 4, p 140-148, ISSN:2447-0228, DOI:<https://dx.doi.org/10.5935/2447-0228.20180021>
- [22] SOUZA Z D, MOREIRA S A H, DA COSTA B E. "Centrais hidrelétricas: implantação e comissionamento". 3. ed. Rio de Janeiro 2018. Disponible en: <https://www.amazon.es/Centrais-Hidrel%C3%A9tricas-Implanta%C3%A7%C3%A3o-Comissionamento-Zulcy/dp/8571933782>

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflictos de intereses

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Leonardo Peña Pupo : <http://orcid.org/0000-0003-3779-9576>

Realiza la programación del método en la herramienta computacional y la revisión bibliográfica discutida en el artículo. Participó en el análisis de los resultados y redacción del borrador del artículo y la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Ernesto Yoel Fariñas Wong: <http://orcid.org/0000-0002-8798-0114>

Organiza metodológicamente la investigación, discute y elabora en conjunto con el autor principal resultados obtenidos en la investigación presentados en el artículo propuesto. Participó en el análisis de los resultados y redacción del borrador del artículo y la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.