

RECYT

Año 22 / N° 33 / 2020 / 27–32

Nuevo enfoque para el análisis energético-económico en la selección de las conductoras de impulsión

New focus for the energy-economic analysis in the selection of the pressurized pipes

José Luis Amador Vilariño¹, José Bienvenido Martínez Rodríguez², Oscar Brown Manrique^{3, *}

1- Departamento de Mantenimiento. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. Provincia de Camagüey.

2- Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH). Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría". Cujae.

3- Centro de Estudios Hidrotécnicos (CEH). Facultad de Ciencias Técnicas. Universidad de Ciego de Ávila "Máximo Gómez Báez".

*E-mail: obrown@unica.cu

Recibido el 10 de julio de 2018, Aprobado el 11 de octubre de 2019.

Resumen

La investigación se realizó en tres obras hidráulicas: la estación de bombeo de la presa Máximo, la Potabilizadora de Camagüey y la estación de bombeo de la presa Pontezuela. Los resultados obtenidos demostraron que el método propuesto para el diseño de conductoras provocó una disminución de la potencia de las bombas y del costo de operación en 30,2% y 29,2 respectivamente y un tiempo de amortización promedio de 6,51 años. Los valores de velocidades más económicas estuvieron entre 0,52 m s⁻¹ a 0,79 m s⁻¹ con un promedio de 0,655 m s⁻¹. Los diseños hidráulicos de conductoras con reducción del diámetro para alcanzar la presión requerida en la descarga de la bomba; generan pérdidas superiores en casi dos veces la potencia necesaria en los motores de las electrobombas debido a que constituye un caso de estrangulación de la corriente; por lo que en caso de ser necesario esta variante se debe utilizar una válvula para que las pérdidas sean relativamente más bajas.

Palabras clave: Velocidad de diseño; Diámetro económico; Pérdidas de carga; Energía.

Abstract

The research was carried out in three hydraulic projects: the pumping station of Maximum dam, Camagüey Water treatment and the Pontezuela dam. The obtained results demonstrated that the proposed method for pipes design resulted on a power pumps decrease, cost operation reduction to 30,2% and 29,2% respectively and time amortization average within 6,51 year- time. The cheapest speed values were among 0,52 m s⁻¹ to 0,79 m s⁻¹ with an average of 0,66 m s⁻¹. The hydraulic conductor designs with the necessary diameter reduction to reach the required pressure in pump discharge, generate higher losses in almost twice the times the needed power in the electric pump motors because it constitutes a case of strangling of the current. So, if this variant is necessary, a valve should be used in order to relatively reduce the losses.

Keywords: Speed design; Economic diameter; Charge losses; Energy.

Introducción

En el diseño ingenieril, los ingenieros hidráulicos requieren frecuentemente realizar cálculos relacionados con la determinación del diámetro de las conductoras, donde el diámetro óptimo representa un aspecto que influye significativamente desde el punto de vista económicos y energéticos. En este tipo de problemas, es recomendable la utilización de software para lograr mayor rapidez y exactitud [1]. Además del diámetro, la selección de los materiales apropiados, la correcta instalación y el mantenimiento son elementos esenciales para el funcionamiento correcto [2,3]. Todos estos esfuerzos permiten disminuir la intensidad energética a partir del análisis de los aspectos relacionados con el agua y energía [4].

La determinación del diámetro económico ha sido tratada por diferentes autores como [5,6,7,8,9]; pues generalmente se utiliza la ecuación de Bresse que no considera los costos de operación, por lo que los diámetros son relativamente elevados y las velocidades del flujo inferiores a 1,0 m s⁻¹; sin embargo, el diámetro económico debe basarse en los costos de la energía de bombeo y en los de amortización de la inversión [10]; de lo contrario, los sistemas hidráulicos dejan de ser eficientes cuando utilizan excesivos recursos humanos, materiales y económicos [11]. En esto influye también, el envejecimiento de las tuberías, las cuales pueden mejorar su funcionamiento con la aplicación de nuevos métodos de rediseño acorde con el desarrollo tecnológico actual [12].

En Cuba los criterios económicos siguen quedando en un segundo plano en comparación con los técnicos, a la hora de tomar decisiones relacionadas con las variantes de proyecto y con la recuperación de las inversiones que se realizan [13] y en el diseño de tuberías se establece como requisito que la velocidad de circulación en las tuberías de la ruta crítica no sobrepase los $1,5 \text{ m s}^{-1}$ sin que este esté basado ningún análisis económico realizado en el país [14].

En el diseño de conductoras es necesario realizar la evaluación del riesgo y formular programas de mejoramiento que formen parte de las estrategias de gestión del riesgo [15]. Todo lo expuesto anteriormente permite considerar como objetivo del trabajo proponer un nuevo enfoque para el análisis energético-económico en la selección de las conductoras de impulsión utilizadas en los sistemas hidráulicos.

Materiales y Métodos

La investigación se basó en el diagnóstico hidráulico y energético realizado en las tres obras hidráulicas siguientes: (a) los proyectos de la estación de bombeo de la presa Máximo para el abastecimiento de agua a la ciudad de Camagüey; (b) la operación de la Potabilizadora de Camagüey, donde se abren y cierran diariamente válvulas de 1000 mm para que las bombas de 250 kW trabajen en los parámetros de funcionamiento establecidos y (c) el proyecto de la de la estación de bombeo de la presa Pontezuela a partir del uso de electro-bombas con presión de trabajo de 90 m.

Los cálculos hidráulicos se realizaron mediante un programa desarrollado en esta investigación denominado "SISTELEC" basado en la metodología propuesta por [16].

En el análisis económico se tuvieron en cuenta los aspectos siguientes:

- Los precios de piezas, válvulas, bombas, grupos electrógenos, arrancadores, cables y transformadores se obtuvieron de los siguientes documentos: facturas de Cuba Hidráulica Provincial y Nacional; catálogos y listados de precios del Departamento de Presupuestos; precios de la Organización Básica Eléctrica y los ofrecidos por [17] y [18] para el combustible fósil y las fuentes renovables de energías.
- En el costo de la materia prima del PEAD (actualizado por Cuba Hidráulica Nacional) se consideró el costo de electricidad, que es de 698 kW.h t^{-1} con un 4,5% por el seguro de flete.
- Todos los costos de inversión adquiridos en el exterior, se incrementaron por el interés por créditos; usándose el 8% a pagar en 5 años.
- El costo de la energía eléctrica en kW.h en las líneas de 13,8 y 34,5 kV se tomaron de la Unión Nacional Eléctrica con un valor de 0,15 USD.
- Los cálculos de costo-beneficio de las estaciones de bombeo se realizaron en una sola moneda (Dólares

norteamericano, USD) para la energía, los precios de las tuberías, el equipamiento y las materias primas que el país tiene que adquirir en el mercado internacional.

Las variantes consideradas en el análisis general de las conductoras con un caudal de 300 l s^{-1} , longitud de 30 km, tiempo de vida útil de 20 años y tiempo de bombeo de 24 h al día durante todos los días del año fueron las siguientes:

- **A: 1x500 mm:** Una conductora de 500 mm de diámetro, proyectada por el método tradicional.
- **B: 1x800 mm:** Una conductora de 800 mm de diámetro, diseñada por el método propuesto.
- **C: 1x900 mm:** Una conductora de 900 mm de diámetro, diseñada por el método propuesto.

Las variantes para el análisis de las conductoras de la estación de bombeo de la presa Máximo para un caudal de 550 l s^{-1} , tiempo de vida útil de 20 años y tiempo de bombeo de 24 h al día durante todos los días del año fueron las siguientes:

- **D: 1x800 mm (P-I):** Una conductora de 800 mm de diámetro proyectada por el método tradicional y construida; tiene una longitud de 17,8 km desde la presa Máximo hasta una inyección hecha en una tubería vieja de 1000 mm de hormigón pre-tensado.
- **E: 2x800 mm (P-Pot):** Dos conductoras de PEAD en paralelo de 800 mm de diámetro, diseñada por el método propuesto; tiene una longitud de 35,9 km desde la presa Máximo hasta la Potabilizadora pasando por la inyección.
- **F: 2x900 mm (P-Pot):** Dos conductoras de PEAD en paralelo de 900 mm de diámetro, diseñada por el método propuesto; tiene una longitud de 35,9 km desde la presa Máximo hasta la Potabilizadora pasando por la inyección.
- **G: 2x1000 mm (P-Pot):** Dos conductoras de PEAD en paralelo de 1000 mm de diámetro, diseñada por el método propuesto; tiene una longitud de 35,9 km desde la presa Máximo hasta la Potabilizadora pasando por la inyección en la conductora de hormigón.
- **H: 2x800 mm (P-I) + 2x900 (P-Pot):** Dos conductoras en paralelo de 800 mm de diámetro, diseñada para ser construida y resolver el problema existente; tiene una longitud de 17,8 km desde la Presa Máximo hasta la inyección en la conductora de hormigón, acoplada a dos conductoras en paralelo de 900 mm de diámetro interior y longitud de 35,9 km desde la presa Máximo hasta la Potabilizadora pasando por la inyección. en la conductora de hormigón.
- **I: 2x800 mm (P-I) + 1x1000H (I-Pot):** Dos conductoras en paralelo de 800 mm de diámetro, diseñada para ser construida y resolver el problema existente; tiene una longitud de 17,8 km desde la presa Máximo hasta la inyección en la conductora de hormigón, acoplada, además a la conductora de 1000 mm de diámetro interior de hormigón existente con una distancia de 18,1 km hasta la Potabilizadora.

Las variantes evaluadas en el análisis de las conductoras de la estación de bombeo de la presa Pontezuela para un caudal de 745 l s⁻¹, longitud de 22 km, tiempo de vida útil de 20 años y 92 días de bombeo al año fueron las siguientes:

- **J: 1x800 mm:** Una conductora de 800 mm de diámetro, diseñada por el método propuesto para la estación de bombeo de la presa Pontezuela.
- **K: 1x1000 mm:** Una conductora de 1000 mm de diámetro, diseñada para ser construida y resolver el problema existente en la conductora de la estación de bombeo de la presa Pontezuela.

La selección de la variante más económica a partir del análisis por anualidades se realizó por la ecuación propuesta por [19], la cual se escribe como:

$$C_T = I + C_A \cdot n \tag{1}$$

$$G_O = C_B = C_A \cdot n \tag{2}$$

Donde:

C_T es el costo total; I la inversión; C_A el costo anual; n el periodo de vida útil; G_O el gasto de operación; C_B el costo de bombeo.

El cálculo de las anualidades se realizó con el software CALCO desarrollado también en esta investigación en el cual se incluyen el costo total equivalente y el costo anualizado total que se calculan según [19] mediante las ecuaciones siguientes:

$$CAT = \frac{r(1+r)^{20n} - 1}{(1+r)^n - 1} I + C_A \tag{3}$$

Donde CAT es el costo anualizado total; r la tasa de interés bancaria; n el periodo de vida útil; I la inversión inicial; C_A el costo anual.

Resultados y Discusión

En la tabla 1 se presentan los resultados de la selección de variantes económicas, en función de la potencia que entra por los cables del motor (P_{ent}); la diferencia del costo de la energía del bombeo con respecto a la energía de bombeo del método tradicional para el periodo de un año ($\Delta CE_{año}$); la diferencia del costo de la energía total con respecto a la calculada por el método tradicional para el periodo de 20 años ($\Delta CE_{20años}$); la velocidad del flujo (v); la carga total (H_t) y el porcentaje de carga total con respecto a la carga estática de 30 m (PH_t).

En la variante A, donde se aplicó el método tradicional se obtuvo un diámetro real de 455 mm y velocidad de 1,86 m s⁻¹, que está comprendida dentro de las “normales” especificada en la norma cubana NC-53-121/84 donde esta variable puede variar desde 1,2 m s⁻¹ hasta 1,8 m s⁻¹.

Los mejores resultados se lograron en la variante C donde se aplicó el método propuesto con un diámetro de

900 mm por tener las mayores diferencias positivas del costo de la energía de bombeo. En este caso la diferencia de potencias de los motores eléctricos fue de 693 kW.

En la tabla 2 se presentan los resultados de la selección de variantes económicas para el diseño de la conductora de la estación de bombeo Máximo en función de las variables explicadas en la tabla 1, con la incorporación del tiempo de amortización con respecto a la conductora construida (T_A) y la ganancia con respecto a la conductora construida en un periodo de 20 años ($G_{20años}$). Se puede observar que, en la variante D, la carga total de la tubería actual instalada con diámetro de 800 mm es de 102,2 m; sin embargo, con la adición por parte del proyectista de 44 m adicionales para lograr la supuesta presión necesaria en la tubería de la estación de bombeo cubano-búlgara se llegó al valor de 146 m. Esta solución no es favorable; porque requiere del estrangulamiento de las válvulas en la descarga de las bombas para reducir la presión de 146 m hasta 102,2 m; lo que implica un gasto de energía innecesaria por no haberse hecho un análisis correcto.

En la propia tabla 2 se comprueba que existen grandes diferencias de potencias entre la variante D y el resto de las variantes analizadas. En esta variante la potencia es de 1215 kW, lo que representa un consumo de energía superior en el rango de 1,7 a 2,2 veces. La variante E resultó ser la más económica dentro de las conductoras diseñadas con la metodología propuesta. Esto responde al hecho de que se obtuvo la mayor ganancia y el menor tiempo de amortización respecto a la conductora construida.

La variante más económica de forma absoluta se encontró en la variante I consistente en una propuesta para la reconstrucción adecuada del proyecto ya ejecutado. El uso de dos tuberías de 800 mm en lugar de una permite reducir significativamente la fricción. Con esta variante se alcanza una diferencia de potencia y de carga total de 549,00 kW y 58,20 m respectivamente.

Tabla 1: Análisis general de conductoras con diferentes diámetros.

Variantes	P _{ent} (kW)	ΔCE _{año} (USD)	ΔCE _{20años} (USD)	v (m s ⁻¹)	H _t (m)	PH _t (%)
Diseñada por el método tradicional						
A: 1x500 mm	847,30	-	-	1,86	212,02	706,00
Diseñada por el método propuesto						
B: 1x800 mm	180,18	867342,00	18871270,00	0,68	45,09	150,00
C: 1x900 mm	153,34	902847,00	18984730,00	0,52	37,95	126,50
Diferencia	693,96					

Tabla 2: Diseño de la conductora de la estación de bombeo Máximo.

Variantes	P _{ent} (kW)	ΔCE _{año} (USD)	T _A (años)	G _{20años} (USD)	v (m s ⁻¹)	H _t (m)	PH _t (%)
Proyectada por el método tradicional y construida							
D: 1x800 mm (P-I)	1215,00	-	-	-	1,20	146,00	208,00
Diseñada por el método propuesto							
E: 2x800mm (P-Pot)	662,30	590362,00	4,49	7381675,00	0,68	86,15	123,00
F: 2x900mm (P-Pot)	606,90	650429,00	13,90	4454024,00	0,60	79,18	113,00
G: 1x1000mm (P-Pot)	698,00	541938,00	6,70	7204393,00	0,85	90,49	129,00
Diferencia	552,70						

Variantes	P_{ent} (kW)	$\Delta CE_{año}$ (USD)	T_A (años)	$C_{20años}$ (USD)	v (m s ⁻¹)	H_t (m)	PH_t (%)
Diseñada para ser construida y resolver el problema existente							
H: 2x800mm (P-I) + 2x900mm (I-Pot)							
	636,00	625710,00	3,87	10091762,00	0,64-0,51	82,40	117,00
I: 2x800 mm (P-I) + 1x1000H (I-Pot)							
	666,00	570003,00	1,15	10755408,00	0,64-0,79	87,80	
Diferencia	549,00					58,20	

En la figura 1 se muestra la curva de potencia en kW contra caudal en l s⁻¹ de las bombas centrífugas instaladas en la estación de bombeo de la presa Máximo, en la que se observa que la potencia que se entrega para 115 l s⁻¹ y 146 m de carga es de 215 kW en cada una de las cinco bombas de 110 l s⁻¹; sin embargo, en la variante I (2x800 mm + 1x1000H) la potencia de la bomba no es superior a 130 kW en cada una de ellas.

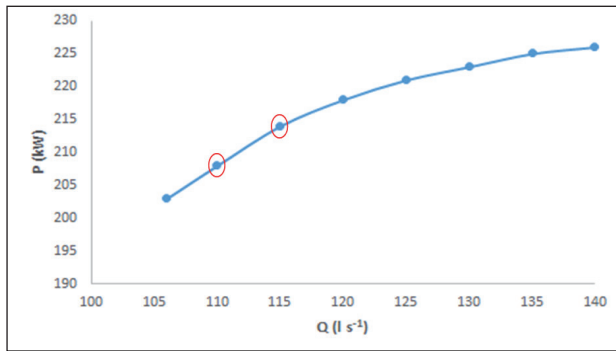


Figura 1: Curva de potencia - caudal.

Si se hace una comparación entre las cinco bombas que debieron haberse seleccionado con carga de 102 m y caudal de 110 l s⁻¹ respecto a las que se instalaron con carga de 146 m y caudal de 115 l s⁻¹, se observa que es necesario el estrangulamiento para garantizar la protección de los motores. Esta operación equivale para las cinco bombas estranguladas, utilizar un motor con una potencia superior a 315 kW, acoplado a un reductor que trabaja las 24 horas del día. Como consecuencia de este diseño insatisfactorio, la Empresa de Acueductos de la provincia de Camagüey determinó en marzo del 2009, utilizar la estación de bombeo de Máximo sólo para emergencias.

En la tabla 3 se presentan los resultados de la selección de variantes económicas para el diseño de la conductora de la estación de bombeo de la presa Pontezuela en función de las mismas variables consideradas en la tabla 2; pero con la inclusión del tiempo de bombeo anual (TB_a) expresado en días por año. Este caso representa el diseño de estaciones de bombeo con sus conductoras donde se hacen adaptaciones de tuberías a las bombas, cuando en realidad debe ser siempre al revés.

Tabla 3: Parámetros del diseño de la conductora de la estación de bombeo de la presa Pontezuela.

Variantes	P_{ent} (kW)	$\Delta CE_{año}$ (USD)	T_A (años)	$C_{20años}$ (USD)	v (m s ⁻¹)	H_t (m)	TB_a (días año ⁻¹)
Proyectada por el método tradicional y construida							
J: 1x800 mm	930,00	-	-	-	1,80	90,00	92,00
Diseñada para ser construida y resolver el problema existente							
K: 1x1000 mm	511,00	139120,00	1,28	2603000,00	1,07	48,00	92,00
Diferencia	419,00					42,00	

El análisis de este diseño indica que, para el caudal transportado y la cantidad de días de funcionamiento, el diámetro económico de la tubería debió ser de 1000 mm y no de 800 mm, como realmente fue proyectada (variante J), lo que incrementa innecesariamente el gasto de operación. La variante K es la más económica al lograr una diferencia favorable de 419 kW de potencia y 42 m de carga total.

En la figura 2 se muestran los resultados del cálculo económico para diferentes variantes de diseño a partir del software CALCO, lo que le permite al proyectista seleccionar el mejor resultado teniendo en cuenta los costos de inversión, operación y totales que ofrece este programa con mucha rapidez y confiabilidad.

En la figura 3 se presentan los resultados del análisis por anualidades a partir del cual se comprobó que el caso de análisis general de las conductoras, los resultados más económicos se encontraron en la variante C con caudal de 300 l s⁻¹ y diámetro de 900 mm de PEAD.

En este cálculo se empleó una tasa baja de interés bancario de 3%, la cual es utilizada por [19]; debido a que no existe un mecanismo explícito de recuperación de la inversión a través del cobro del agua que entrega la obra y también a que las inversiones que se realizan actualmente por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, se hacen adquiriendo el dinero en el exterior o en una entidad donadora.

Conclusiones

Se demostró que el método propuesto para el diseño de conductoras logró disminuir la potencia instalada en kW en un 30,2% y los costos de operación en un 29,2% para todas las variantes más económicas, con respecto al diseño con el método tradicional; mientras que se logró que el tiempo de amortización promedio fuera de 6,51 años.

Se obtuvieron valores de velocidades más económicas entre 0,52 m s⁻¹ a 0,79 m s⁻¹ con un promedio de 0,655 m s⁻¹.

Los diseños hidráulicos de conductoras al revés constituye un caso de estrangulación; por lo que de ser necesario su realización, debe hacerse con una válvula para que el valor de las pérdidas sea relativamente bajo.

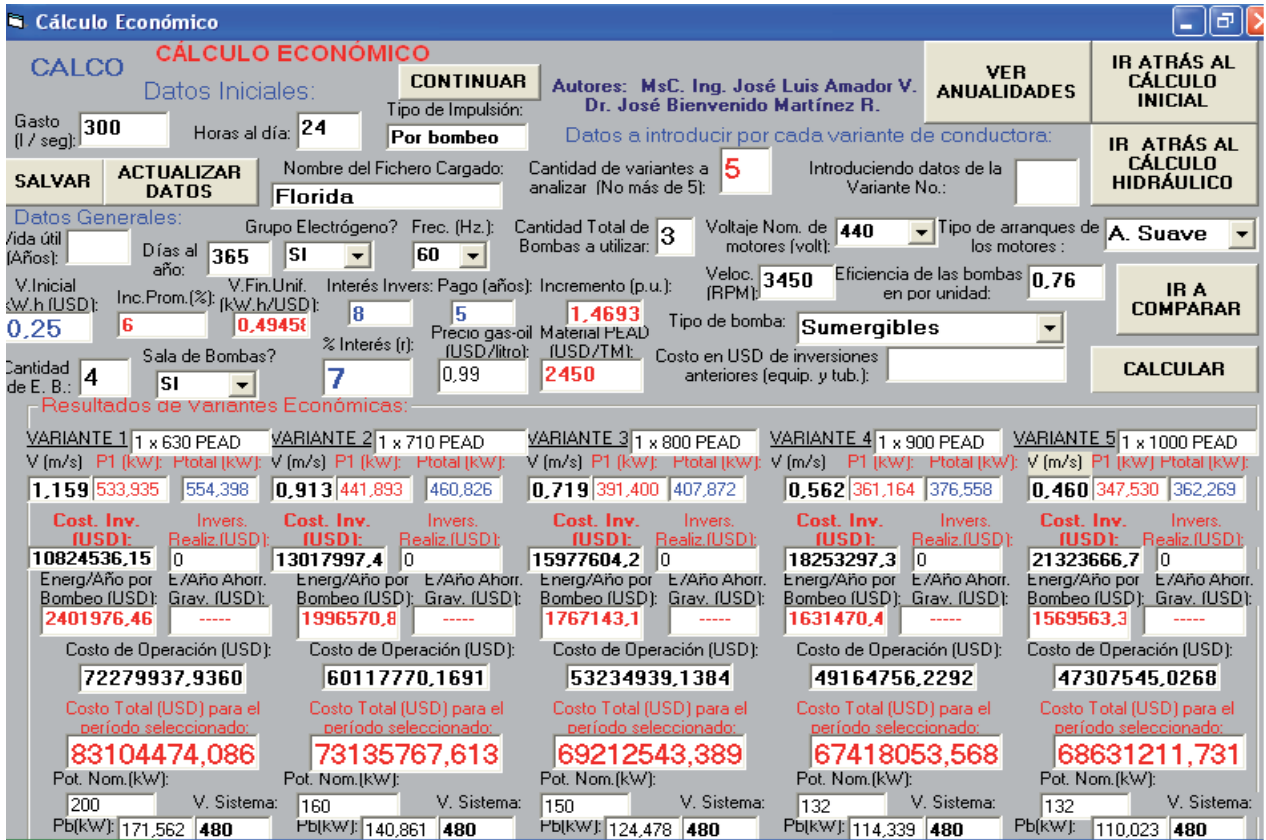


Figura 2: Cálculo económico con el programa CALCO.

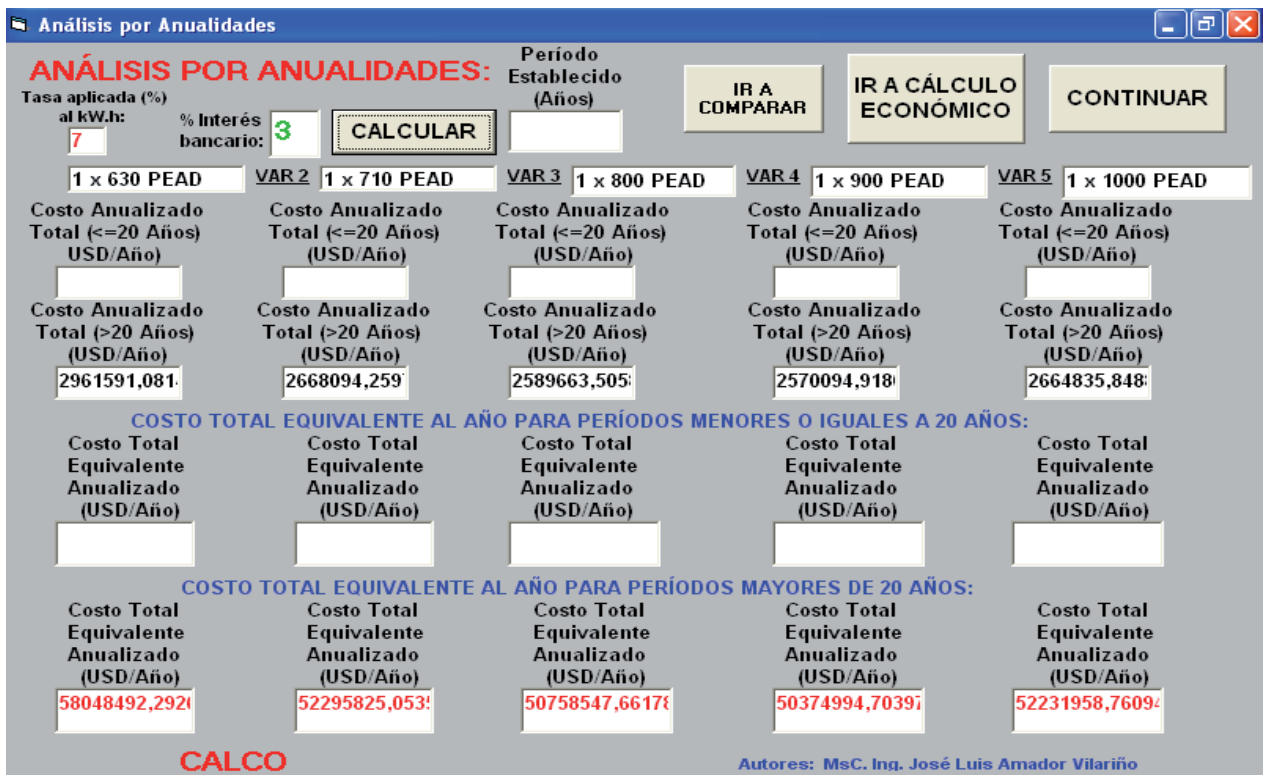


Figura 3: Análisis por anualidades con el programa CALCO.

Referencias

1. **García, J. y Morales, A.** *Determinación del diámetro en sistemas de tuberías utilizando el Mathcad*. Revista Ingeniería, Vol.7, no 1, pp. 53-58. ISSN: 1665-529X. México, 2003.
2. **Nakamura, Y.** *Estudio económico de distintos tipos de conducciones de aguas*. Boletín Técnico INIA No. 44. ISBN: 0717-4829. Chile, 2000.
3. **Stuyt, L.C., Dierickx, W. y Martínez, J.** *Materiales para sistemas de drenaje subterráneo*. Estudio FAO Riego y Drenaje 60. ISSN: 978-92-5-305427-5. Roma, Italia, 2009.
4. **IDAE.** *Ahorro y Eficiencia Energética en Agricultura de Regadío*. Serie Ahorro y Eficiencia Energética en la Agricultura. ISBN: 84-86850-94-0, Madrid, España, 2005.
5. **Blanco, E., Velarde, S. y Fernández, J.** *Sistemas de bombeo*. Universidad de Oviedo, E. T. S. Ingenieros Industriales. Departamento de Energía, pp.217. ISBN 84-604-9677-5, España, 1994.
6. **Roldán, J., Pulido, I., Camacho, E., Alcaide, M. y Losada, A.** *Problemas de hidráulica para riego*. Universidad de Córdoba. ISBN: 84-7801-526-4, pp.284. España, 1999.
7. **Pedrevello, C.L.** *Diâmetro mais econômico de uma canalização de recalque*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol.5, no 2, pp. 39-42. ISSN: 2318-0331. Brasil, 2000.
8. **Carnicer, E. y Mainar, C.** *Bombas centrifugas*, Segunda edición, Thomson Editores Spain, Paraninfo, S.A, ISBN: 84-283-2243-0, España, 2004.
9. **González, H. y Suarez, A.E.** *Hidrología e hidráulica para ingenieros civiles*. Editorial Félix Varela, ISSN: 978-959-07-1680-5, pp.436, La Habana, Cuba, 2012.
10. **Comisión Nacional del Agua.** *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Cárcamos de bombeo para alcantarillado, funcional e hidráulico. Editor: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, ISBN: 978-968-817-880-5, México, 2007.
11. **Comisión Nacional del Agua.** *Manual de Incremento de la ciencia Física, Hidráulica y Energética en Sistemas de Agua Potable*. ISBN: 978-607-7908-68-5, pp.175, Tlalpan, México, 2012.
12. **Iñiguez, M., Ojeda, W. y Díaz, C.** *Mejoras de eficiencia hidráulica en vertederos con canal de descarga libre en presas: propuesta metodológica*. Tecnología y Ciencias del Agua, Vol.6, no 1, pp. 69-79. ISSN: 0187-8336. México, 2015.
13. **Pérez, L.R., Sánchez, R.M. y Frizzone, J.A.** *Optimal moment to change pressure regulator and sprayer kit on center pivot irrigation machines: application to a study case*". IRRIGA. Brazilian Journal of Irrigation and Drainage. Vol.16, no 4, pp. 450-458. ISSN: 1808-8546, Brasil, 2011a.
14. **Pérez, R., Soto, S.D. y Conde, P.** *El diseño de sistemas de riego localizado a partir de un nuevo criterio de velocidad*. Ingeniería Agrícola. Vol.6, no 3, pp. 48-53. ISSN: 2306-1545. Cuba, 2016b.
15. **Amézquita, C.P., Pérez, A. y Torres, P.** *Evaluación del riesgo en sistemas de distribución de agua potable en el marco de un plan de seguridad del agua*. Escuela de Ingeniería de Antioquia (EIA). Revista EIA. Vol.11, no 21, pp. 157-169. ISSN: 1794-1237. Colombia, 2014.
16. **Pérez, D.** *Estaciones de bombeo*. Editorial Félix Varela, ISBN: 978-959-07-1379-8, pp.295, La Habana, Cuba, 2011.
17. **Bluejay, M.** *How much does electricity cost. What is a kilowatt-hour (kWh)*". [en línea] 2011, Disponible en: <http://michaelbluejay.com/electricity/> [Consulta: 28 de diciembre de 2017].
18. **Rodríguez, J.L.** *La disminución de la alta dependencia del combustible importado para la generación*". Cuba contemporánea. [en línea] 2012, Disponible en: <http://cubasi.cu/cubasi>, [Consulta: 04 de enero de 2017].
19. **Martínez, J.B.** *Economía de los Recursos Hidráulicos*. Editorial Félix Varela, pp.245, La Habana, Cuba, 2000.