Derechos de la imagen: Vecsa-Water

2024

INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, CUJAE
Revista científica del Centro de Investigaciones Hidráulicas

ISSN 2788-6050, RNPS 2066

01

XLV

EQUIPO EDITORIAL

La revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental tiene el propósito de divulgar el conocimiento y contribuir al intercambio de experiencias y la comunicación entre los profesionales y técnicos de habla española. Los temas de interés para la revista incluyen contenidos en la solución de problemas, aplicaciones y desarrollo de la ingeniería hidráulica.

Editor-Director
Dr. José Bienvenido Martínez Rodríguez

Consejo Editorial
Dra. Maray Garrido Monagas *(Directora)*
Dra. Haydee Llanusa Ruiz *(Secretaria de la publicación)*
Dr. Yoermes González Haramboure
Dr. Rafael Pardo Gómez
Dr. Norberto Marrero De León
Dr. Alcides Juan Felipe León Méndez
Dr. Armando Hernández Valdés

Consejo Asesor
Damir Brjanovic, *Instituto UNESCO-IHE, Holanda*
Daniel Prats Rico, *Universidad de Alicante, España*
Joaquín Moreno Caselles, *Universidad Miguel Enrique de Elche, España*
Nahún García Villanueva, *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México*
Raúl Lopardo, *Instituto Nacional del Agua, Argentina*
Alejandro López, *Laboratorio Nacional de Hidráulica, Santiago de Chile*
Jaime Iván Ordóñez, *Universidad Nacional de Colombia, Colombia*
Rafael Guarga Ferro, *Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental, Uruguay*
Abrahán López, *Universidad Francisco de Miranda, Venezuela*
Miguel A. Perozo Ynestroza, *Universidad Francisco de Miranda, Venezuela*
Cristóbal Díaz Morejón, *Ministerio de Ciencia Tecnología y Mediaombiente (CITMA), Cuba*
Alina Hernández Tur, *Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), Cuba*
Rafael Feitó Olivera, *Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de Cuba (UNAICC), Cuba*
Julián Herrera Puebla, *Instituto de Investigación de Riego, Cuba*
Lorenzo E. Camejo Barreiro, *Universidad de Ciego de Ávila, Cuba*
Alfonso Suárez Reytor, *Universidad de Oriente, Cuba*
Eric Cabrera Estupiñán, *Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Ecuador*
Luis Córdova López, *Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (CUJAE), Cuba*
Yoel Martínez González, *Instituto Superior de Ciencias y Tecnologías Aplicada, Cuba*
Ronnie Torres Hugues, *Centro de Servicios Técnicos de Ingeniería y Tecnología de la Construcción, Cuba*
Ifraín Osa Bernal, *HELVEX, Cuba*
Eduardo López Bastida, *Universidad de Cienfuegos, Cuba*
Javier Orccosupa, *Universidad Tecnológica del Perú, Perú*
Natividad Ramírez Ramírez, *Universidad de Guanajuato, México*
Carlos M. López Vázquez, *Instituto UNESCO-IHE, Holanda*
Julio Iván González Piedra, *Universidad de La Habana, Cuba*
Carlos Javier Fernández de Córdova Webster, *Universidad del Azuay, Ecuador*
Lamberto Alvarez Gil, Universidad Central de Las Villas (UCLV), Cuba
Felicita González, *Instituto de Investigación de Riego, Cuba*
Enrique Cisneros, *Instituto de Investigación de Riego, Cuba*

Vol. XLV
No. 01 (Ene-Mar 2024)
ISSN 2788-6050, RNPS 2066

01	Yaset Martínez Valdés Félix Riaño Valle Yilian Álvarez Gil	Diámetro óptimo de conductoras de polietileno de alta densidad en sistemas de bombeo directo a la red	3 16
02	José Alejandro Solís Quintana Carlos Lázaro Castillo García	Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia de la Estación Meteorológica de Caibarién.	17 33
03	Rafael Miguel Pacheco Moya Pável Vargas Rodríguez	Análisis de Envolvente de Datos: herramienta para evaluar eficiencia en el regadío cubano.	34 44
04	Adrian Steven Pacheco Peñafiel	Acciones para la optimización del sistema de agua potable en Manglaralto, Ecuador.	45 53
05	Juan Camilo Castro Velásquez Sebastián Pérez Ocampo Juan David Rincón Vanegas	Evaluación de algunas expresiones unificadas para el factor de fricción de Darcy-Weisbach.	54 63
06	Mario Ramos Joseph Reniel Carvajal Alfonso Alcides J. León Méndez Raisa Socorro Llanes	Evaluación del impacto de las variables bioclimáticas en el consumo: Caso estudio Sector de Aguas de La Habana	64 76
07	Henry Bory Prevez Angel Orlando Castellano Sánchez	Modelo en MatLab de centrales maremotérmicas de ciclo de Anderson. Primera aproximación	77 90

Diámetro óptimo de conductoras de polietileno de alta densidad en sistemas de bombeo directo a la red

Yaset Martínez Valdés E-MAIL: yaset@civil.cujae.edu.cu
Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), La Habana, Cuba

Félix Riaño Valle E-MAIL: riano@tesla.cujae.edu.cu
Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), La Habana, Cuba

Yilian Álvarez Gil E-MAIL: yilianal@civil.cujae.edu.cu
Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), La Habana, Cuba

RESUMEN

Se presenta una nueva metodología para calcular el diámetro económico de una conductora de polietileno de alta densidad (PEAD) de un sistema fuente por bombeo para suministro de agua con inyección directa a la red. La misma se basa en el concepto de Rango de Eficiencia Óptimo del Sistema de bombeo (REOS), de conjunto con nuevos conceptos, criterios y enfoques técnicos que se complementan para la obtención del diámetro óptimo de la conductora. Se incorporan en los análisis, la determinación de la presión nominal (PN) según las características de cada tramo del perfil de la tubería y sus respectivos diámetros interiores. El procedimiento propuesto tiene en cuenta otras variables que dependen del tipo de instalación, esquema de diseño y variación de la demanda horaria. El procedimiento se ilustra con la solución de un problema práctico.

PALABRAS CLAVES: diámetro, económico, conductora, inyección, red de abasto

Optimum diameter of high density polyethylene conductors in direct-to-network pumping systems

ABSTRACT

A new methodology is presented for calculating the economic diameter of a high density polyethylene (HDPE) pipeline in a pumped source system for water supply with direct injection into the network. It is based on the concept of the Range of Optimal Efficiency of the Pumping System (REOS), together with new concepts, criteria and technical approaches that complement each other to obtain the optimal diameter of the pipeline. The determination of the nominal pressure (PN) according to the characteristics of each section of the pipe profile and their respective internal diameters are incorporated in the analyses. The proposed procedure takes into account other variables that depend on the type of installation, design scheme and variation in hourly demand. The procedure is illustrated with the solution of a practical problem.

KEYWORDS: diameter, economical, pipeline, injection, supply network

Septiembre 2023-RECIBIDO APROBADO Marzo 2024

Esta obra está bajo una licencia internacional creative commons attribution-noncommercial 4.0

01 INTRODUCCIÓN

La inyección directa a la red se plantea como una solución alternativa a la construcción de depósitos elevados de gran capacidad, cuando estos tienen un costo económico prohibitivo, o bien que la construcción de estos causa un impacto ambiental y/o urbanístico en la arquitectura urbana de una ciudad, especialmente en aquellas con topografía eminentemente llana. Los objetivos que persigue un sistema de regulación de alimentación directa a la red se pueden resumir en: optimizar los rendimientos de las bombas, haciendo que estas trabajen en zonas de elevada eficiencia, funcionar siempre lo más cerca posible de la curva de consigna de la red, a fin de que la eficiencia global de la instalación sea lo más alto posible, evitando gastos energéticos innecesarios, limitar al máximo las bruscas variaciones de caudal originadas por las maniobras de arranque o parada de grupos (Pérez 1993) (Cabrera 1996).

Para calcular el diámetro económico de las conductoras en los sistemas fuente con inyección directa a la red, debe hacerse un análisis técnico-económico sobre la base de resolver un problema de optimización con variables hidráulicas que varían en el tiempo. La resolución del problema planteado permite determinar el diámetro óptimo, es decir, aquel que minimiza los costos totales de la instalación (costos de inversión más gastos de explotación). Este proceso está sujeto a limitaciones, entre las fundamentales: rango de diámetros comerciales, material y espesor de la tubería, límites de velocidades en la tubería, costos de las tuberías, mano de obra y equipamiento, y amortización e intereses de la infraestructura construida (Pulido 2001) (Fuertes et al 2007).

El objetivo de la metodología propuesta es determinar el diámetro económico de una conductora de PEAD de un sistema fuente por bombeo con inyección directa a la red. La misma se fundamenta en el concepto de Rango de Eficiencia Óptima del Sistema (REOS) y en la selección de la presión nominal necesaria por tramos de la tubería y sus respectivos diámetros interiores (Martínez et al 2022). Se consideran también otros aspectos esenciales que inciden en el cálculo del diámetro óptimo, tales como: costos de inversión, costos de operación y mantenimiento, rango de velocidades permisibles, eficiencia de los equipos de bombeo, la ecuación que define la variación de la eficiencia operacional por la referencia del Método del Índice de Eficiencia Mínima (MEI por sus siglas en inglés) y la curva de evolución de consumos diaria. De esta manera se calcula el diámetro económico para el cual el costo anualizado total (CAT) del sistema es mínimo en el rango de eficiencia considerado. El procedimiento se ejemplifica mediante la resolución de un problema para el caso de un sistema fuente por bombeo con demanda variable y servicio continuo las 24 horas.

02 DESARROLLO

La metodología que se propone establece un procedimiento analítico para el cálculo del diámetro económico de una tubería de impulsión con variación del gasto de circulación y su Rango de Eficiencia Óptima del Sistema (REOS) propuesto por Martínez et al. (2022). El procedimiento se estructura en los siguientes pasos:

1. Selección de los límites de velocidades recomendables
2. Definición de la curva de evolución de consumos para el día tipo de diseño
3. Determinación preliminar de la presión nominal de la tubería *(PN_p)*
4. Selección de los diámetros posibles a utilizar en la conductora
5. Cálculo de la presión nominal de diseño (PN) de la tubería
6. Determinación de la carga a presión inicial y la eficiencia de operación para el intervalo de gastos del día tipo de diseño

7. Asignación de la presión nominal por tramos de la tubería y sus respectivos diámetros interiores.

Paso 1. Selección de los límites de velocidades recomendables

El rango de velocidades permisibles para una conducción depende de razones funcionales y energéticas. Las primeras se representan en las presiones mínimas y máximas en la tubería, ruidos, vibraciones, infrautilización de la conducción, depósitos de materias en suspensión, erosión, incrustaciones y costos de mantenimiento; mientras que la segunda se refiere a la magnitud de las pérdidas de carga en la tubería. Teniendo en cuenta estos factores se han propuesto formulaciones para la determinación de las velocidades límites aconsejables y rangos de velocidades recomendables (Cabrera 1996).

Paso 2. Definición de la curva de evolución de consumos para el día tipo de diseño

A partir de datos de proyecto se debe confeccionar el gráfico de demanda horaria de consumos para el día tipo de diseño, del cual se obtendrán la información relativa al caudal máximo, $Q_{máx.}$, el caudal mínimo, $Q_{mín.}$, y el rango de caudales de mayor frecuencia de ocurrencia, $\Delta Q_{mf.}$, el cual se define como el intervalo que engloba a los caudales de mayor ocurrencia a lo largo del día tipo de diseño (véase figura 1).

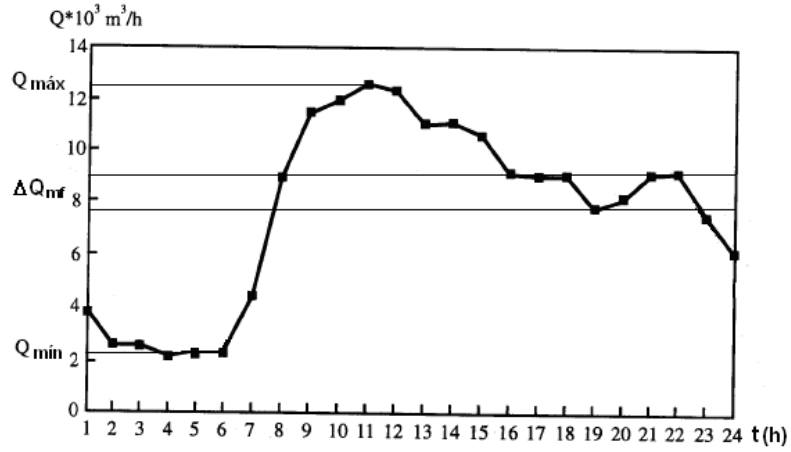

Figura 1. Curva de evolución de consumos horarios para el día tipo de diseño.

Paso 3. Determinación preliminar de la presión nominal de la tubería *(PN_p)*

La determinación de la presión nominal de la tubería con carácter preliminar, se debe realizar en función de la diferencia entre la cota piezométrica en el nodo de entrada a la red correspondiente al máximo caudal, CPn.máx. y la cota elevación en el inicio de la conductora, Zi. Para el cálculo de la primera, debe conocerse a priori la carga necesaria a la entrada a la red determinada para el gasto máximo que circula por la conductora, Hsist.máx.

$$PN_p = CP_{n.máx} - Z_i = H_{sist..máx.} + Z_n - Z_i \qquad (1)$$

Donde: *PNp*: presión nominal de la tubería calculada de forma preliminar, (m); *CPn.máx.*: cota piezométrica en el nodo de entrada a la red correspondiente al máximo caudal, (m); *Zi*: cota elevación en el inicio de la conductora, (m); *Hsist.máx.*: carga necesaria a la entrada a la red determinada para el gasto máximo, (m) y *Zn*: carga a elevación en el nodo de entrada a la red, (m).

Esta diferencia servirá como valor mínimo de referencia para seleccionar de un catálogo comercial de tuberías de PEAD, una presión nominal (clase) inmediata superior a la magnitud de esta.

Paso 4. Selección de los diámetros posibles a utilizar en la conductora

A partir de la PN_p determinada en el paso anterior, se procede a seleccionar los posibles diámetros comerciales dentro de una clase (*PN*). Para esto, es necesario determinar, primeramente, el rango de diámetros teóricos, mediante la utilización de la ecuación de Continuidad y el rango de velocidades permisibles. El gasto de referencia que se tomará para el diseño será el caudal medio del rango de caudales de mayor frecuencia de ocurrencia, Q_{pmf}.

$$D = \left(\frac{4Q_{pmf}}{\pi V} \right)^{0,5} \qquad (2)$$

Donde: *D*: diámetro interior teórico de la tubería, (m); Q_{pmf}: caudal promedio del rango de caudales de mayor frecuencia de ocurrencia, (m^3/s) y *V*: velocidad de circulación en la tubería, (m/s).

Sustituyendo en esta ecuación el valor de la velocidad mínima permisible, se obtendrá el valor máximo del rango de los diámetros posibles a utilizar en la tubería de impulsión. El límite mínimo de este intervalo se obtiene evaluando en la citada ecuación, el valor máximo permisible para la velocidad. Obtenido este rango de diámetros teóricos, se procede a elegir los diámetros comerciales inscritos dentro de este, del referido catálogo de tuberías de PEAD. Luego se procede a verificar el cumplimiento de las restricciones de velocidad establecidas para cada uno de estos diámetros comerciales para todo el intervalo de gastos horarios del día tipo de diseño.

Paso 5. Definición de la presión nominal de diseño (*PN*) de la tubería

Determinado el rango de diámetros comerciales para la conducción se procede a asignar la presión nominal para cada uno, considerando la carga a presión inicial máxima, $(P/\gamma)_{imáx.}$, obtenida de la diferencia entre la cota piezométrica en la sección inicial de la conductora para el caso del gasto máximo y la cota elevación en el inicio de la misma. La primera se obtendrá sumándole a la cota piezométrica en el nodo de entrada a la red correspondiente al máximo caudal, $CP_{n.máx.}$, las pérdidas de carga en la conducción derivados de este. Calculada la carga a presión inicial máxima necesaria para cada diámetro del rango establecido, se procede a seleccionar la presión nominal de diseño, teniendo en cuenta que esta sea mayor que la requerida, aproximándose siempre por exceso dentro de la clase. Las pérdidas de carga se calcularán a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach, con el coeficiente de fricción, *f* determinado por la fórmula de Swamee-Jain.

$$hf = 0.0826\, f \frac{L_{eq}}{D^5} Q^2 \qquad (3)$$

Donde: *hf*: pérdidas de carga en la conducción, (m); *f*: coeficiente de fricción de la tubería, (adim.); L_{eq}: longitud equivalente del sistema, (m); *D*: diámetro interior de la tubería, (m) y *Q*: caudal de circulación, (m^3/s).

$$f = \frac{0,25}{\left[log\left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{N_R^{0,9}} \right) \right]^2} \qquad (4)$$

Donde: ε: rugosidad absoluta de la tubería asociada al material, (m); D: diámetro interior de la tubería, (m) y N_R: número de Reynolds que caracteriza el flujo en la conducción, (adim.).

Cuando para un diámetro su $(P/\gamma)_i$ resulte mayor que la asignada de forma preliminar, se deberá tomar la inmediata superior correspondiente al mismo diámetro exterior. Al realizar este cambio, el espesor aumenta y habrá que recalcular nuevamente las pérdidas de carga y la carga de presión inicial, resultando una nueva PN necesaria. Este proceso se repetirá hasta que se encuentre el diámetro interior cuya $(P/\gamma)_i$ sea menor que la *PN* de diseño de la tubería.

Paso 6. Definición del rango de eficiencia óptima del sistema (REOS) y determinación del diámetro económico de la tubería de impulsión.

El rango de eficiencia óptima del sistema (REOS), se define como aquel que garantiza el costo anualizado total mínimo del sistema para un diámetro nominal específico, en función de las variables establecidas previamente. El diámetro óptimo será aquel que cumpla todas las restricciones técnicas, funcionales y económicas que tenga el menor costo anualizado total. En el cálculo de la sección más económica de una conducción intervienen los costos de inversión, los energéticos y los de operación y mantenimiento. La ecuación que define el costo anualizado total (*CAT*) es la siguiente (Martínez 2011):

$$CAT = C_i a_t + C_e + C_{o\&m} \qquad (5)$$

Donde: *CAT*: costo anualizado total asociado a cada variante, ($); C_i: costo de inversión de la conducción, ($); a_t: factor de amortización de la inversión, (adim.); C_e: costo anual de la energía consumida ($) y $C_{o\&m}$: costo anual de operación y mantenimiento de la aducción, ($).

Para el cálculo del costo de inversión en la etapa de estudio de factibilidad, solo se considerará el costo de inversión del sistema de conducción. La decisión de no incluir otros tipos de costos, viene dado por el poco peso significativo que puede tener esta(s) en el costo total de inversión, máxime en este tipo de sistemas que se caracterizan por tener grandes longitudes y diámetros relativamente significativos (Fuertes et al. 2007). Teniendo en cuenta esta observación, el costo de inversión quedará simplificado a la ecuación:

$$C_i = p_c L \qquad (6)$$

Donde: C_i: costo total de la inversión, ($); p_c: precio por metro lineal de tubería para un diámetro dado, ($/ml) y L: longitud de la conductora, (m).

Para anualizar el costo de inversión durante el periodo de vida útil de la obra, se utiliza el factor de amortización que se define en la ecuación 7 (Pulido, Gutiérrez y Asensio 2006).

$$a_t = \frac{(1+r)^n r}{(1+r)^n - 1} \qquad (7)$$

Donde: a_t: factor de amortización, (adim.); r: tasa de interés para el proyecto, (adim.) y n: tiempo de amortización de la inversión en años, (adim.).

El costo energético anualizado para la etapa de diseño del proyecto se calcula mediante la expresión 8 (López-Cortijo et al. 2008):

$$C_e = \sum_{i=1}^{24} \frac{\gamma Q_i H_i}{\eta_{ebi}} t_b t_{ri} = \sum_{i=1}^{24} \frac{\gamma Q_i \left((P/\gamma)_{ii} + hf_i \right)}{\eta_{ebi}} t_b t_{ri} \qquad (8)$$

Donde: C_e: costo energético anualizado, ($); γ: peso específico del agua, (N/m^3); Q_i: caudal de circulación en la conductora para la hora *i*, (m^3/s); H_i: carga de bombeo o carga dinámica total para la hora *i*, (m); $(P/\gamma)_{ii}$: carga a presión inicial para la hora *i*, (m); *hf*: pérdidas de carga en la conducción para la hora *i*, (m); η_{ebi}: eficiencia del equipo de bombeo o equipo de bombeo equivalente para la hora *i*, (adim.); t_b: tiempo de bombeo anual por horarios de demanda = 1 *h* y t_{ri}: precio de la tarifa eléctrica contratada para cada intervalo de demanda: madrugada (10:00 pm.-6:00 am.), diurno (6:00 am.-6:00 pm.) y pico (6:00 pm.-10:00 pm.), ($/kWh).

Una vez definida la presión nominal de diseño para cada diámetro, se procede a determinar la (P/γ)i característica de cada hora, tal como se explicó en el paso anterior, para el caso del caudal máximo. La eficiencia de operación para cada hora, η_{ebi} resulta de la multiplicación de la eficiencia de diseño asignada por los valores de corrección adimensionales que dependen de cada caudal adimensional. Estos últimos se calculan como la relación entre el gasto de cada hora y el caudal promedio del rango de caudales de mayor frecuencia de ocurrencia, Q_{pmf}. Para este cómputo es necesario definir a priori la cantidad de bombas que asumirán la operación, con el objetivo de establecer la distribución de los caudales horarios por bomba. Los valores de corrección adimensionales para la eficiencia son obtenidos mediante la ecuación de eficiencia adimensional elaborada a partir de los valores propuestos por el Método del Índice de Eficiencia Mínima (MEI por sus siglas en inglés) (UE 2012):

$$\eta_a = 2{,}04945 Q_a - 1{,}04922 Q_a^2 \qquad (9)$$

Donde: η_a: eficiencia adimensional, (adim.) y Q_a: caudal adimensional, (adim.).

La ecuación propuesta por los autores para el cálculo de la eficiencia adimensional fue obtenida utilizando el software TableCurve 2D V4.0, con un coeficiente de correlación, r^2 = 0,99999, un error relativo medio de $3{,}65 \cdot 10^{-4}$%, con valores máximo y mínimo de este error de 0.0156% y 0 respectivamente. Es necesario apuntar que en esta etapa de estudio de factibilidad los valores de eficiencias de operación horaria se consideran valores estimados, debido a que en esta fase del proyecto aún no se conocen las características de los equipos de bombeo que se instalarán en el sistema.

Para el cálculo del costo de operación y mantenimiento se trabajará con el concepto propuesto por Featherstone y El-Jumaily (1983) que lo expresa como un ocho por ciento del costo energético. Todos estos costos tienen tendencias de crecimiento inverso, lo cual hace que, para cualquier sistema de conducción, la función de costo global (*CAT*) presente en general un mínimo dentro de los límites impuestos por las consideraciones del rango de velocidades permisibles. El diámetro que corresponde al menor *CAT* será el diámetro económico o diámetro óptimo, D_{opt}.

Para calcular el REOS correspondiente a cada diámetro de la conducción, se comenzará asumiendo un valor máximo práctico de la eficiencia del equipo de bombeo o equipo de bombeo equivalente de un 80%. Se entiende como eficiencia del equipo de bombeo equivalente, la eficiencia global del conjunto de equipos de bombeo instalados en una estación de bombeo, solo si son bombas iguales y tienen un acople al sistema de manera simétrico (caso de bombas iguales acopladas en paralelo). Este proceso continúa disminuyendo la eficiencia, -se propone que las variaciones sean del 1%-, hasta llegar a un valor de esta para el cual se produce un cambio de diámetro hacia el comercial inmediato superior.

Esta tendencia es esperada ya que, a medida que se reduce el valor de la eficiencia, el valor del diámetro económico aumenta. El valor precedente a esta eficiencia límite se considera el mínimo del REOS que se analiza, siendo la misma a su vez, el valor máximo del siguiente. Siguiendo este razonamiento, el diámetro óptimo a seleccionar será aquel que tenga el mayor REOS factible desde el punto de vista práctico. Este procedimiento difiere conceptualmente de los tradicionalmente citados en la literatura, los cuales se basan en asumir un único valor de eficiencia, -en algunos casos sin aclarar a que eficiencia se refiere y en otros como la eficiencia de la bomba, lo cual constituye un error conceptual-, para calcular el costo energético como paso previo para la determinación del diámetro óptimo.

Paso 7. Asignación de la presión nominal por tramos de la tubería y sus respectivos diámetros interiores.

Determinado el diámetro óptimo para la conducción y su correspondiente REOS, se procede a la asignación de la presión nominal por tramos de la tubería y sus respectivos diámetros interiores. Para esto hay que tener en cuenta el perfil longitudinal del trazado de la tubería, con el fin de verificar los estacionados singulares (puntos de mayor y menor cota topográfica) y revisar si la PN definida para el diámetro económico en el paso 5, se mantendrá durante todo el trazado de la conducción. Puede suceder que se inicie el trazado de la conductora con una PN y en un tramo hacia aguas abajo, producto de una depresión en su perfil longitudinal, se necesite una presión de trabajo mayor que la inicial. También se puede presentar el caso contrario, en el cual, durante un tramo ascendente en el trazado de la tubería, pudiera ser conveniente reducir la PN de trabajo. Ambas situaciones se pueden presentar en el mismo trazado de la conductora y en varios tramos a lo largo del mismo. Este análisis se realizará teniendo en cuenta solamente la rasante piezométrica correspondiente al gasto máximo.

El cambio de la presión de diseño a lo largo de la tubería, tendrá un impacto económico favorable en el proyecto, en comparación con la práctica frecuente de mantenerla constante durante todo el trazado. Al asignar a cada tramo del perfil de la tubería la PN necesaria, se pueden reducir los costos de la conducción (tramos de tubería con un espesor menor) y los costos energéticos (un menor espesor conlleva a un mayor diámetro interior, lo cual se traduce en menores pérdidas de carga y por consiguiente menores costos energéticos). Desde el punto de vista hidráulico, al asumir tramos con diferentes PN y sus respectivos diámetros interiores, deberá analizarse toda la conducción como un sistema de tuberías en serie, aunque el diámetro exterior se mantenga igual a lo largo de todo el trazado.

A continuación, se resuelve un ejemplo práctico para ilustrar la metodología propuesta para el cálculo del diámetro óptimo de una tubería de impulsión que trabaja con un régimen de demanda variable y servicio continuo para abastecer a una red de abasto.

Datos del sistema fuente y la red de abasto: El sistema fuente por bombeo funciona con una inyección directa a la red. Se usará como material de la tubería de impulsión el polietileno de alta densidad (PEAD) con una rugosidad absoluta de la tubería, ϵ = 0,0000025 m. La longitud equivalente de la conductora, L_{eq} = 3000 m. Se considerará una viscosidad cinemática para el agua de $\upsilon = 10^{-6}$ m^2/s. Las cotas a elevación en las secciones inicial y final de la conductora (nodo de entrada a la red) son: Z_i = 29,184 m y Z_n = 39,646 m, respectivamente. La carga necesaria a la entrada de la red para el gasto máximo, $H_{sist.máx.}$ es 79,59 m. Trabajarán dos bombas con iguales características en el sistema fuente.

Paso 1. Selección de los límites de velocidades recomendables

Siendo el material de la tubería de impulsión PEAD, se tomará como rango de velocidades permisibles: $0{,}3^{-3}$ m/s, según lo establecido en el Instructivo para el diseño con tuberías de PEAD para el caso del trasiego de agua limpia (INRH 2006) en su amplio rango de utilización, con el objetivo de contemplar la amplia variación del gasto en el diseño de la conductora.

Paso 2. Definición de la curva de evolución de consumos para el día tipo de diseño

El gráfico de evolución de consumos para el día tipo de diseño se representa en la figura 2. Del análisis de este se puede extraer como información: caudal mínimo, $Q_{mín.}$: 29,4 L/s (hora 4); caudal máximo, $Q_{máx.}$: 119 L/s (hora 20); rango de caudales de mayor frecuencia de ocurrencia, $\Delta Q_{mf.}$: 70 a 94,5 L/s (intervalo de 12 a 17 h) y caudal medio del rango de caudales de mayor frecuencia de ocurrencia, $Q_{pmf.}$: 82,83 L/s.

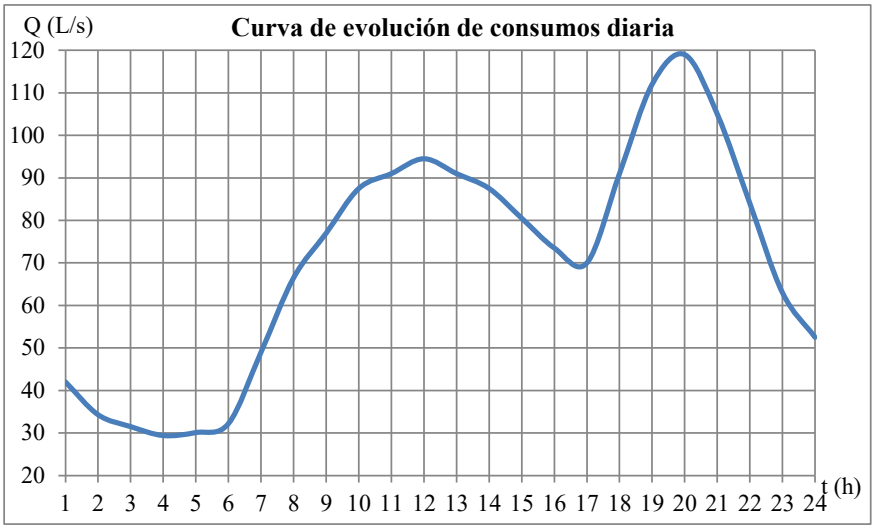

Figura 2. Gráfico de demanda horaria de consumos para el día tipo de diseño

Paso 3. Determinación preliminar de la presión nominal de la tubería *(PN_p)*

A partir de la información inicial y trabajando con la ecuación 1, se comienza el procedimiento para la determinación de la presión nominal de la tubería.

$$PN_p = CP_{n.máx} - Z_i = H_{sist..máx.} + Z_n - Z_i = 79{,}59 + 39{,}646 - 29{,}184 = 90{,}05m$$

Tomando este valor como referencia se procede a seleccionar de un catálogo de tuberías de PEAD de fabricación nacional, para la calidad PE-100 del material, una PN de 10 atm. equivalente a una presión nominal de diseño de 101,94 m.c.a.

Paso 4. Selección de los diámetros posibles a utilizar en la conductora

Definido el rango de velocidades recomendables y el caudal medio del rango de caudales de mayor frecuencia de ocurrencia, $Q_{pmf.}$: 82,83 L/s, se trabaja con la ecuación 2 para determinar el rango de diámetros teóricos: 187,49 a 592,91 mm. Tomando como referencia la PN 10 atm., los ocho diámetros interiores posibles a seleccionar son: 220,26, 277,56, 312,82, 352,48, 396,56, 440,63, 493,52 y 555,22 mm, para los respectivos diámetros exteriores: 250, 315, 355, 400, 450, 500, 560 y 630 mm. A continuación, se procede a verificar el cumplimiento de las restricciones de velocidad establecidas para cada uno de estos diámetros interiores para todo el intervalo de gastos del día tipo de diseño. Estos resultados se compilan en la tabla 1 con las siguientes observaciones.

Tabla 1. Verificación del cumplimiento de las restricciones de velocidad.

$D_{int.}$ (m)	$V_{mín.}$ (0,3 m/s) $Q_{mín.}$ = 29,4 L/s	$V_{máx.}$ (3,0 m/s) $Q_{máx.}$ = 119 L/s	Observaciones
220,26	0,772	3,123	No se cumple la restricción de velocidad máxima para la hora 20
277,56	0,486	1,967	Cumple las restricciones de velocidad
312,82	0,382	1,548	Cumple las restricciones de velocidad
352,48	0,301	1,219	Cumple las restricciones de velocidad
396,56	0,238	0,963	No se cumple la restricción de velocidad mínima para el intervalo de 2 a 6 h
440,63	0,193	0,780	No se cumple la restricción de velocidad mínima para el intervalo de 1 a 6 h
493,52	0,154	0,622	No se cumple la restricción de velocidad mínima para el intervalo de 1 a 7 h y en la hora 24
555,22	0,121	0,491	No se cumple la restricción de velocidad mínima para los intervalos de 1 a 8 h y de 23 a 24

Teniendo en cuenta las observaciones declaradas en la tabla 1 se decide tomar como diámetros válidos para el diseño los cuatro primeros, haciendo la observación que el diámetro interior de 220,26 mm se seleccionará porque el incumplimiento de la restricción de la velocidad máxima sucede para un intervalo corto de tiempo (1 h) y solo se excede en un 4,1%.

Paso 5. Definición de la presión nominal de diseño (PN) de la tubería

Definidos los diámetros interiores para la PN 10 se procede a asignar la presión nominal que deberá tener cada diámetro del rango a partir del cálculo de la carga a presión inicial máxima, $(P/\gamma)_{imáx.}$, para el caso del gasto máximo. La cota piezométrica en el nodo de entrada a la red correspondiente al máximo caudal, CPn.máx.es independiente del valor del diámetro y su valor es 119,24 m. Los resultados correspondientes a cada diámetro se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Asignación de la presión nominal para cada diámetro.

$D_{ext.}$ (mm)	$D_{int.}$ (PN 10) (mm)	$CP_{n.máx.}$ (m)	N_R ($Q_{máx.}$) (adim.)	f ($Q_{máx.}$) (adim.)	hf ($Q_{máx.}$) (m)	$(P/\gamma)_{imáx.}$ (m)	PN asignada (atm.)
250	220,26	119,24	687887,09	0,012596	85,26	175,31	> 16
315	277,56	119,24	545887,83	0,013041	27,78	117,83	12,5
355	312,82	119,24	484358,47	0,013292	15,57	105,62	12,5
400	352,48	119,24	429851,73	0,013556	8,74	98,79	10

Para el diámetro de 220,26 mm ($D_{ext.}$ = 250 mm) el valor de la $(P/\gamma)_{imáx.}$ supera el valor de 163,1 m.c.a (PN 16 atm.) por lo que en este punto se descarta de forma definitiva este diámetro. Debido a que para los diámetros de 277,56 (315) mm y 312,82 (355) mm se produjo un cambio de PN de 10 a 12,5 atm., se procede a seleccionar los nuevos diámetros interiores para esas nuevas PN y volver a calcular la carga a presión inicial para asignar la PN necesaria (véase tabla 3).

Tabla 3. Asignación de la PN para los diámetros interiores de 277,56 y 312,82 mm.

$D_{ext.}$ (mm)	$D_{int.}$ (PN 12,5) (mm)	$CP_{n.máx.}$ (m)	N_R ($Q_{máx.}$) (adim.)	f ($Q_{máx.}$) (adim.)	hf ($Q_{máx.}$) (m)	$(P/\gamma)_{imáx.}$ (m)	PN asignada (atm.)
315	268,18	119,24	564966,39	0,012971	32,81	122,86	12,5
355	302,27	119,24	501261,20	0,013218	18,38	108,43	12,5

Paso 6. Definición del rango de eficiencia óptima del sistema (REOS) y determinación del diámetro económico de la tubería de impulsión.

Para la determinación del REOS para cada diámetro y la selección del diámetro económico de la conductora, será necesario calcular los diferentes costos que componen el costo anualizado total, *CAT*. En la tabla 4 se presentan los precios por metro lineal de las tuberías de PEAD de fabricación nacional para los diámetros exteriores seleccionados en el paso 5 con sus respectivas presiones de diseño.

Tabla 4. Relación de precios por metro lineal en función del Dext. y la PN.

$D_{ext.}$ (mm)	315	355	400
PN asignada (atm.)	12,5	12,5	10
Precio ($/mL)	96,39	124,70	128,86

Para calcular el factor de amortización se asume una tasa de interés del 8% y una vida útil para la conductora de 50 años. Sustituyendo estos valores en la ecuación 7 se encuentra un valor de a_t de 0,0817.

Empleando la expresión 8 se procede a determinar el costo energético anual, utilizando la tarifa eléctrica M-1A. Tarifa de media tensión con actividad continua (20 horas y más servicio continuo) establecida por la Unión Eléctrica del Ministerio de Energía y Minas (UE-Minem 2018). El precio de las tarifas eléctricas son las siguientes: en el horario de la madrugada (10:00 pm.- 6:00 am.) es de 0,028 $/kWh; en el horario del día (6:00 am.- 6:00 pm.) es de 0,042 $/kWh y en el horario del pico eléctrico (6:00 pm.- 10:00 pm.) es de 0,083 $/kWh. Obtenido este, se procede a calcular el costo de operación y mantenimiento a través de la ecuación 10.

Para el cálculo del REOS de los distintos diámetros se comienza evaluando diferentes valores de la eficiencia del equipo de bombeo a partir del valor de 0,8 como valor máximo práctico. Como trabajarán dos bombas en el sistema, se procede primeramente a calcular los caudales horarios por bomba, trabajando con el caudal medio del rango de caudales de mayor frecuencia de ocurrencia, $Q_{pmf.}$ (82,83 L/s). Con estos se pasa a determinar los respectivos caudales adimensionales por hora que servirán para calcular los valores de corrección adimensionales a través de la ecuación 9. Por último, se computan los valores de eficiencia de operación relativa a cada gasto, η_{ebi} como se puede observar en la tabla 5 para el caso de una eficiencia de 0,8 (80%).

Tabla 5. Cálculo de la eficiencia de operación para una eficiencia de referencia de 0,8.

t (h)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Q (L/s)	42	34,3	31,5	29,4	30,1	32,2	49	66,5	77	87,5	91	94,5
n_{bo} (adim.)	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
Q_a (adim.)	1,01	0,83	0,76	0,71	0,73	0,78	1,18	0,80	0,93	1,06	1,1	1,14
η_a (adim.)	1	0,98	0,95	0,93	0,93	0,96	0,96	0,97	1	0,99	0,98	0,97
η_{ebi} (adim.)	0,66	0,64	0,62	0,61	0,61	0,63	0,63	0,64	0,66	0,65	0,65	0,64
t (h)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Q (L/s)	91	87,5	80,5	73,5	70	91	112	119	105	84	63	52,5
n_{bo} (adim.)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1
Q_a (adim.)	1,1	1,06	0,97	0,89	0,84	1,1	1,35	1,44	1,27	1,01	0,76	1,27
η_a (adim.)	0,98	0,99	1	0,99	0,98	0,98	0,85	0,78	0,91	1	0,95	0,91
η_{ebi} (adim.)	0,65	0,65	0,66	0,65	0,64	0,65	0,56	0,51	0,6	0,66	0,62	0,6

Leyenda: n_{bo}: número de bombas operativas en la hora *i*.

En la tabla 6 se presentan el *CAT* y sus componentes para una eficiencia del equipo de bombeo del 80%. Siguiendo el procedimiento para otros valores de eficiencia se obtiene que el diámetro de menor *CAT* es el de $D_{ext.}$ = 315 mm ($D_{int.}$ = 268,18 mm para PN 12,5 atm.) con un REOS de 80% (*CAT* = $64263,73) a 65,8% (*CAT*= $73033,82), por lo cual se define como el diámetro económico de la conductora. Si se garantiza que los equipos de bombeo se seleccionen con una eficiencia dentro de ese rango para trabajar en la instalación, se asegurará que este sea el diámetro óptimo para la conducción.

Tabla 6. Costos de inversión anualizado, energético, operación y mantenimiento y CAT para una eficiencia de referencia de 80%.

$D_{ext.}$ (mm)	$D_{int.}$ (mm)	C_i ($)	$C_i \cdot \alpha_t$ ($)	C_e ($)	$C_{o\&m}$ ($)	*CAT* ($)
315	268,18	289165,91	23624,85	37628,58	3010,29	64263,73
355	302,27	374099,03	30563,89	34000,73	2720,06	67284,68
400	352,48	386583,59	31583,88	31574,48	2525,96	65684,31

Para el $D_{ext.}$ = 400 mm ($D_{int.}$ = 352,48 mm para PN 10 atm.) se obtiene una disminución del *CAT* invirtiendo el comportamiento creciente, lo cual sucede por una ruptura de la relación *D* vs. precio tubería vs. PN para los diámetros que se analizan, debido a que estos tienen PN diferentes, lo cual influye en el costo de inversión, específicamente en el costo de la tubería por metro lineal.

Realizando un análisis adicional para verificar la sensibilidad del cambio en la solución del diámetro económico cuando cambia el gasto de referencia, se realiza el procedimiento para otros dos gastos: 70,58 L/s (valor medio de la serie diaria de gastos del día tipo de diseño) y 99,17 L/s (valor obtenido atendiendo al criterio del rango de fiabilidad). Debe tenerse en cuenta que al modificarse el gasto cambian los valores de los gastos adimensionales, que a su vez inciden en los valores de la eficiencia adimensional y real de operación, reflejándose esto en el costo energético y de operación y mantenimiento, dependiente de este, y por consiguiente en el *CAT*.

Para el gasto de 99,17 L/s se obtiene que el diámetro de menor *CAT* es el de $D_{ext.}$ = 315 mm ($D_{int.}$ = 268,18 mm para PN 12,5 atm.) con un REOS de 80% (*CAT* = $62049,44) a 61,2% (*CAT*= $73853,07); mientras que para el caudal medio de 70,58 L/s, el diámetro de menor *CAT* sigue siendo el de $D_{ext.}$ = 315 mm ($D_{int.}$ = 268,18 mm para PN 12,5 atm.) con un REOS de 80% (*CAT* = $61483,80) a 60,5% (*CAT*= $73686,27). Para este último valor de gasto es necesario utilizar tres bombas para operar en el sistema. Como resultado de este análisis de sensibilidad se puede observar que el diámetro óptimo sigue siendo el mismo para las dos opciones de gasto de diseño.

Paso 7. Asignación de la presión nominal por tramos de la tubería y sus respectivos diámetros interiores.

Teniendo en cuenta el perfil longitudinal del trazado de la tubería reflejado en la figura 3, se procede a verificar los estacionados singulares (puntos de mayor y menor cota topográfica) para asignar la presión nominal definitiva en cada tramo de la tubería. El perfil está representado por 151 estacionados, equidistantes 20 m entre estas, destacándose cinco puntos característicos donde se produce un cambio de pendiente que origina un cambio de PN en la conductora. Los puntos característicos (estacionados) 0 (0 + 00 m) y 5 (3000 + 00 m) se corresponden con la sección inicial y final de la tubería, respectivamente. En la tabla 7 se muestra esta información detallada.

Tabla 7. Información del perfil longitudinal de la tubería y sus características hidráulicas.

Puntos singulares	0	1	2	3	4	5
Estación (m)	0,00	760,00	1880,00	2380,00	2820,00	3000,00
Cota tubería (m)	29,184	41,451	49,590	45,055	38,853	39,646
Cota piezométrica (m)	152,045	143,733	131,484	126,016	121,204	119,235
Carga a presión *(P/γ)* (m)	122,861	102,282	81,894	80,961	82,351	79,589

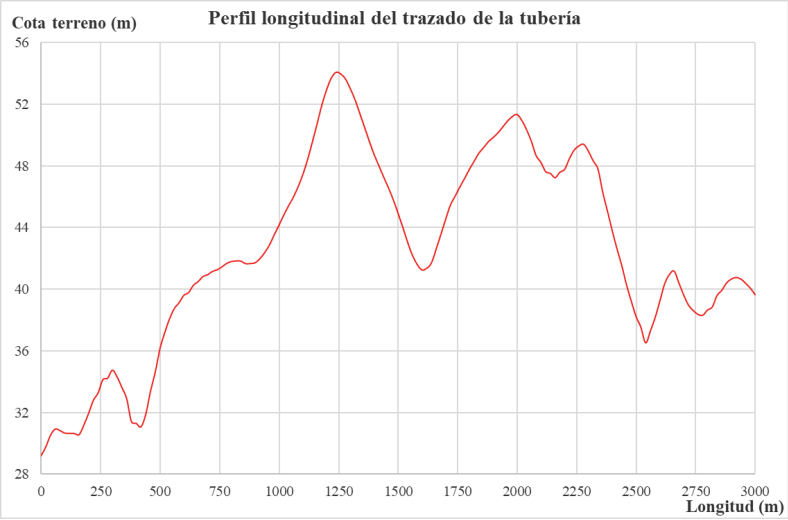

Figura 3. Perfil longitudinal del trazado de la conductora.

En la tabla 8 se presenta la información sobre la cantidad de tramos de tubería con sus respectivos PN y sus longitudes por tramos y total. Basado en este criterio es posible utilizar hasta tres PN distintas a lo largo del trazado de la conductora, utilizando el mismo diámetro exterior de 315 mm y asignándole los diámetros interiores a cada tramo en función de la presión nominal. Entre paréntesis se señalan los puntos característicos que acotan la distancia de cada intervalo.

Tabla 8. Longitudes parcial y total para cada tramo con su asignación de la PN.

PN asignada tramo (atm.)	$D_{ext.}$ (mm)	$D_{int.}$ (mm)	L_1 (m)	L_2 (m)	L_{total} (m)
12,5	315	268,2	760,00 (0-1)		760,00
10	315	277,6	1120,00 (1-2)	440,00 (3-4)	1560,00
8	315	284,9	500,00 (2-3)	180,00 (4-5)	680,00

La conductora estará compuesta por cinco tramos de distintas PN, las cuales se irán alternando a lo largo de ésta en función de la topografía del trazado de la tubería. El diámetro exterior de 315 mm se mantendrá durante todo el trazado de la conductora con diámetros interiores que variarán en función de la PN de cada tramo. De esta forma la aducción se analizará como un sistema de tuberías en serie y en este sentido se evaluará su *CAT* para compararlo con la solución tradicional de mantener el mismo PN a lo largo del trazado. A partir de asumir un valor de eficiencia de 80%, la solución propuesta por el nuevo método arroja un *CAT* = $59665,52, alcanzándose un ahorro de la solución de $4598,20 al año (7,15%) cuando se compara con la solución clásica *CAT* = $64263,73). Realizando el mismo análisis para el valor inferior del REOS (65,8%) el ahorro anual que se consigue es de un 7,59% ($5541,90).

En líneas generales, la magnitud de este ahorro está dado por diferentes factores técnicos y topográficos como son: longitud de la conductora (mayor longitud conlleva un incremento de este ahorro); la eficiencia del sistema de bombeo (al aumentar disminuye el ahorro potencial que se puede conseguir); y el perfil longitudinal de la conductora (una pendiente creciente a todo lo largo

del trazado aumenta el ahorro posible, reduciéndose este, con el aumento de las inflexiones en la vertical. A partir de estos criterios y para el ejemplo en cuestión, el ahorro alcanzado de 7,15 a 7,59% para todo el REOS se logró debido al cambio de la PN de 12,5 a 10 y 8 atm. en una longitud total de 2240 m (74,67% de la longitud de la conductora.).

Para la unión de los distintos tramos de tuberías con diferentes espesores, Martínez et al. (2022) propone el diseño de un accesorio hidráulico con la tipología de una expansión o contracción gradual (según como se le coloque teniendo en cuenta el sentido del flujo) que tendrá espesores diferentes en la sección inicial y final. La función del mismo será la de conectar los diferentes tramos de distintas PN con diferentes espesores, con el fin de lograr un ahorro en cuanto a la inversión de la conducción. Para el ejemplo ilustrativo, sería necesario un total de cuatro accesorios de este tipo: dos para cambio de PN de 10 a 8 atm. (expansión gradual), uno para cambio de PN de 8 a 10 atm. (reducción gradual), y uno para cambio de PN de 12,5 a 10 atm. (expansión gradual).

03 CONCLUSIONES

La metodología que se presenta permite determinar el diámetro económico de una tubería de impulsión de PEAD en un sistema fuente por bombeo con inyección directa a la red. Con el procedimiento propuesto, se logra un nuevo enfoque que se desvincula un tanto del planteamiento conocido del proceso de optimización económica del diseño de una conductora, al lograr calcular el rango óptimo de eficiencia propio de cada diámetro, y de ese modo, determinar cuál es el diámetro económico a utilizar en una aducción por bombeo con variación en la demanda horaria. Se demuestra que a medida que el REOS sea mayor el CAT será menor, poniéndose de manifiesto que para cada REOS existe un diámetro económico determinado. En este trabajo se ha pretendido hacer un planteamiento general del procedimiento analítico para la determinación del diámetro óptimo de una tubería de impulsión, sin llegar a resolverlo de manera exhaustiva, incluyendo variables muy específicas que intervienen en el diseño hidráulico y que, como se ha apuntado, no intervienen en la definición de la solución óptima.

En este sentido, los criterios principales que inciden en el proceso de selección son: el costo anualizado total (CAT) y el rango de eficiencia óptima del sistema (REOS). Se presentan además nuevos enfoques técnicos, criterios y formulaciones que complementan este objetivo, a saber: rango de velocidades y de diámetros recomendables para tuberías de PEAD, definición preliminar de la presión nominal de la tubería, formulación de la ecuación del costo anualizado total y sus componentes, obtención de la ecuación de eficiencia adimensional elaborada a partir de los valores propuestos por el Método del Índice de Eficiencia Mínima (MEI) y proceso de asignación de la presión nominal por tramos de la conductora y sus respectivos diámetros interiores. La selección de las PN según las necesidades de cada tramo de la tubería de impulsión contribuye de manera notable a disminuir los costos de la inversión inicial de la conductora. la metodología de cálculo se aplica a un ejemplo práctico para un esquema de diseño muy común en los sistemas fuentes por bombeo con inyección directa a la red. Este nuevo procedimiento de diseño será de gran utilidad tanto en la etapa de anteproyecto como en un proyecto de rehabilitación de sistemas fuente, brindando una ayuda para la selección del diámetro económico de las conductoras, garantizando la solución óptima en el diseño hidráulico del sistema. Se recomienda aplicar la nueva metodología en proyectos que contemplen en su diseño una demanda variable y un servicio continuo.

04 REFERENCIAS

Cabrera E. (1996). "Ingeniería Hidráulica Aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua, 2da Edición, Editorial Unidad Docente Mecánica de Fluidos, Universidad Politécnica de Valencia, t. 1 y 2, ISBN 978-848-94-8701-7, Valencia, España

Featherstone R. E. y El-Jumaily K. K. (1983). "Optimal Diameter Selection for Pipe Networks", Journal of Hydraulic Engineering, 109 (2): 221–234, February, ISSN 0733-9429, Virginia, United States of America

Fuertes V. S., Pérez R., Martínez F. J. y López P. A. (2007). "Optimización del sistema formado por la estación de bombeo, la tubería de impulsión y el depósito de regulación", **Pimentel H., Pérez R. e Iglesias P. L.** (2016). "Abastecimento de água: o estado da arte e técnicas avançadas", pp.: 261-274, Editorial Universidade Federal da Paraíba, ISBN 978-85-7745-078-3, Paraíba, Brasil

Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) (2006). "Instructivo para la utilización de Tuberías y Accesorios de PEAD", 63 pp., La Habana, Cuba

López-Cortijo I., Esquiroz J. C., Aliod R. y García S. (2008). "Determinación de los costes energéticos en el cálculo de redes a presión con bombeo directo", Memorias del XXV Congreso Nacional de Regadíos, Conferencia 15, pp. 1-15, Navarra, España

Martínez Y. (2011). "Metodología para el diseño hidráulico de las estaciones de bombeo para acueducto", Tesis de doctorado, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", Cujae, La Habana, Cuba

Martínez Y., Riaño F. A. y Acosta L. (2022). "Determinación del diámetro económico de una tubería de impulsión de polietileno de alta densidad (PEAD)", Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 43(4), 47–61, ISSN 2788-6050

Pérez R. (1993). "Dimensionado óptimo de redes de distribución de agua ramificadas considerando los elementos de regulación", Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España

Pulido I. (2001). "Diseño y gestión óptimos de sistemas de impulsión y de almacenamiento de agua para riego", Tesis de doctorado, Universidad de Córdoba, Córdoba, España

Pulido I; Gutiérrez J. C. y Asensio R. (2006). "Optimal design of pumping stations of inland intensive fishfarms", Aquacultural Engineering, 35 (2006): 283-291, ISSN 0144-8609, Ámsterdam, Holanda

Unión Eléctrica (UE)-Ministerio de Energía y Minas (Minem) (2018). "Manual de Consumidores: Tarifas eléctricas y su utilización", 33 pp., La Habana, Cuba

Unión Europea (UE) (2012). "Reglamento (UE) Nº 547/2012. Requisitos de diseño ecológico para las bombas hidráulicas", 9 pp., Bruselas, Bélgica, extraído de: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32012R0547 en abril de 2021

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Yaset Martínez Valdés https://orcid.org/0000-0001-9770-022X

Participó en la elaboración de la metodología y redacción del artículo.

Félix Riaño Valle https://orcid.org/0000-0002-9342-6064

Participó en el análisis de los resultados, revisión y redacción del trabajo en su versión final.

Yilian Álvarez Gil https://orcid.org/0009-0003-7644-0694

Trabajó en el procesamiento de los datos del caso de estudio, haciendo contribuciones en su análisis e interpretación. Participó en la búsqueda de información y en la redacción final del trabajo.

Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia de la Estación Meteorológica de Caibarién.

José Alejandro Solís Quintana E-MAIL: cruxjasq@gmail.com
Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara, Cuba

Carlos Lázaro Castillo García E-MAIL: ccgarcia@uclv.cu
Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara, Cuba

Ismabel Domínguez Hurtado E-MAIL: ismabel.dominguez@vcl.insmet.cu
Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara

RESUMEN

El paso constante de los años ha desactualizado las curvas Intensidad-Duración–Frecuencia (IDF) de la provincia de Villa Clara. En particular, el municipio de Caibarién carece de estas normativas, lo que conlleva a la utilización de las pautas establecidas en la norma cubana NC 1239:2018 para la ejecución de obras hidráulicas en la zona. Se lleva a cabo un estudio con el objetivo principal de desarrollar las curvas IDF asociadas a eventos lluviosos convectivos en dicha localidad, proponiendo además un procedimiento para su elaboración. Para lograrlo, se usan novedosas técnicas de ajuste a funciones de distribución y ecuaciones paramétricas y se obtienen como resultado nuevas curvas IDF para la estación meteorológica de Caibarién.

PALABRAS CLAVES: distribución de probabilidad, frecuencia, período de retorno, precipitación, pruebas paramétricas.

Intensity-Duration-Frequency Curves of the Caibarién Meteorological Station

ABSTRACT

The constant passage of time has rendered the Intensity-Duration-Frequency (IDF) curve maps for the province of Villa Clara outdated. Specifically, the municipality of Caibarién lacks them, so the ones outlined in the Cuban standard NC 1239:2018, are used to build hydraulic works in the area. A study is conducted with the primary objective of developing IDF curves associated with convective rainfall events in this locality, and proposes a procedure for elaborating such curves. To achieve this, novel techniques of fitting to distribution functions and parametric equations are used.

KEYWORDS: probability distribution, frequency, return period, precipitation, parametric tests

CITMA CERTIFICADO

Septiembre 2023-RECIBIDO *APROBADO Marzo 2024*

Esta obra está bajo una licencia internacional creative commons attribution-noncommercial 4.0

SciELO

01 INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha logrado identificar un cambio en las intensidades de las lluvias, producido por un efecto del cambio climático persistente y agravante. En cuanto a esto, Thiombiano et al., (2017) explican que la temperatura del aire en la superficie en respuesta al forzamiento antropogénico, causa una atmósfera más cálida y húmeda que intensifica el ciclo hidrológico global y resulta en eventos más extremos.

La lluvia se define principalmente por dos variables: magnitud y frecuencia, lo que se conoce como régimen de precipitación. La magnitud de la lluvia se refiere a la precipitación total expresada en milímetros. Por otro lado, la frecuencia está relacionada con la ocurrencia del fenómeno, indicando cuántas veces se presenta. La duración, por su parte, se refiere al período de tiempo durante el cual se mantiene el aguacero, proporcionando información sobre la extensión temporal de la tormenta. La frecuencia en términos de probabilidad se expresa mediante el período de retorno, por lo tanto, se considera que la intensidad de la precipitación es directamente proporcional al período de retorno. Las afectaciones provocadas por este elemento hidrológico son complejas y difíciles de determinar, ya que pueden variar desde inundaciones por grandes avenidas, hasta la inefectividad de sistemas de alcantarillado de drenaje pluvial, por lo que se han tratado de predecir a través de métodos estadísticos.

Con el paso de los años, se han desactualizado los mapas de curvas IDF de la provincia Villa Clara y no se han desarrollado los estudios necesarios para la creación de nuevas curvas. A esto se suma, además la afectación en los últimos tiempos de varios eventos meteorológicos como los huracanes Sandy, Matthew e Irma. También, las obras de diseño del municipio de Caibarién se realizan actualmente con la norma cubana NC 1239:2018 Especificaciones para el diseño y construcción de alcantarillado sanitario y drenaje pluvial urbano, la cual posee unas curvas IDF generales para todo el país y junto al constante cambio climático, se genera un alto grado de incertidumbre a la hora de obtener los datos necesarios para la creación de nuevas obras hidráulicas eficientes y económicas. Teniendo como objetivo la presente investigación, elaborar las Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia asociadas a los eventos lluviosos convectivos en la Estación Meteorológica de Caibarién, en la provincia de Villa Clara.

02 METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DEL ESQUEMA TECNOLÓGICO DE LA ESTRATEGIA

La información obtenida de la estación meteorológica de Caibarién se resume y se obtienen los valores máximos de precipitación, dando como resultados las series anuales en rangos horarios de 5, 10, 20, 40, 60, 90, 120, 150, 240, 300, 720, 1440, 2880 y 4320 minutos.

Se realizó un análisis de datos faltantes y datos outliers, utilizándose el método de la imputación múltiple para la ausencia de los datos. Se hace un análisis de la calidad de los datos para comprobar la independencia de la serie, por lo que se utiliza la prueba de Mann-Withney, que tiene la capacidad de comparar las diferencias entre dos medianas, basándose en rangos. Para la detección de tendencias y el análisis de estacionalidad de la serie de datos se formuló la prueba de Mann-Kendall, establecida como una prueba no paramétrica con una distribución estadística, con un amplio uso para detectar tendencias y variación espacial de las series hidroclimáticas.

Posteriormente, se estiman los parámetros de la distribución de Gumbel utilizando el procedimiento de los L-momentos, siendo este el más sencillo, pues requiere obtener de la muestra los estimadores de tantos momentos como parámetros tenga el modelo de distribución. Se continúa

con la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov por su capacidad de suponer de manera razonable, que las observaciones pudieran corresponder a la distribución específica, es fácil de calcular y usar, y no requiere agrupación de los datos para lograr finalmente ajustar las curvas IDF al modelo de Montana. El procedimiento descrito con anterioridad supone un orden lógico para el desarrollo de la investigación, expresado en la figura 1, considerándose un esquema tecnológico fomentado por varias metodologías ya existentes.

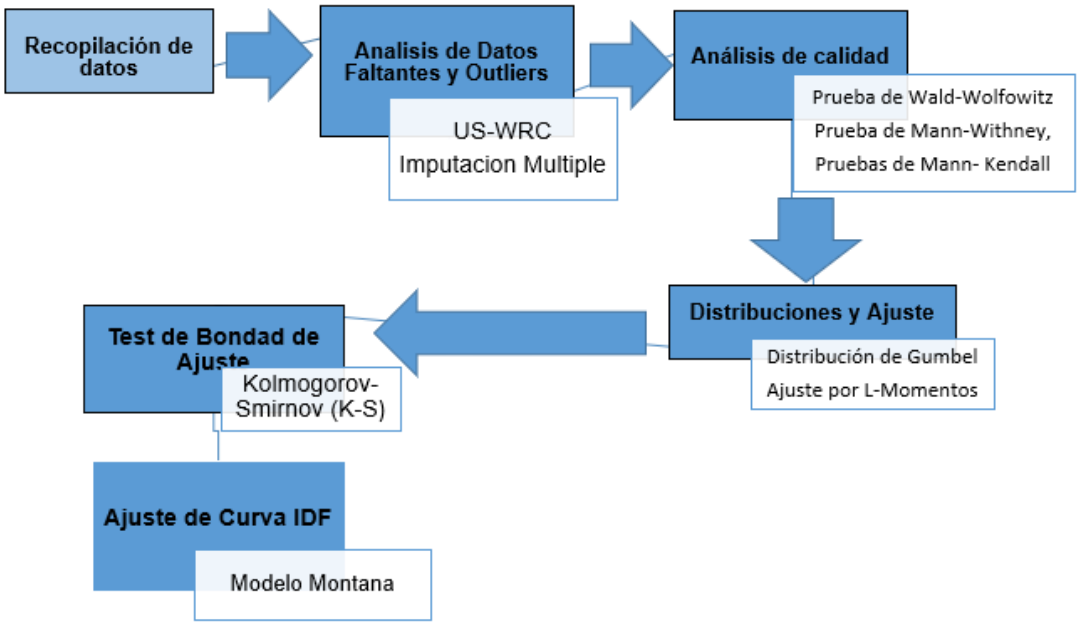

Figura 1: Procedimiento desarrollado para elaborar las Curvas IDF. Fuente: Elaboración propia.

UBICACIÓN GEOGRÁFICA

Caibarién se sitúa en la costa Norte de la provincia de Villa Clara, en la zona central de Cuba. Presenta un clima tropical, al igual que el resto del territorio nacional cuya frontera marítima son los mares tropicales. Las brisas del mar suavizan el clima de la ciudad, lo cual se ve reflejado en los elevados valores de humedad del aire, así como la atenuación de las oscilaciones térmicas diarias en la zona costera. El promedio anual de temperatura es de 25,4°C considerándose agosto el mes más cálido y el más frío, enero. La presión atmosférica disminuye en el verano y aumenta en el invierno, también durante el día se presentan variaciones mínimas, más frecuentes en el invierno.

La estación meteorológica Caibarién (Código 78348) se encuentra, específicamente en el municipio de Caibarién (figura 2), situado en la costa noreste de Villa Clara, localizada en la latitud 22º 29' 48.3" N y longitud 79º 28' 13.3" W con una elevación de 46.27 metros sobre el nivel medio del mar. Fue fundada, el 1ro de agosto de 1987 y se clasifica dentro de la zona rural, con una capacidad manual y automática de captación de datos meteorológicos y la disposición de varios instrumentos adecuados a la actividad meteorológica, entre los cuales se encuentra el pluviómetro y pluviógrafo.

Figura 2: Ubicación geográfica de la Estación Meteorológica Caibarién, provincia de Villa Clara, Cuba. Fuente: INSMET

RECOPILACIÓN DE DATOS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Para la obtención de las series de intensidades máximas de la estación meteorológica de Caibarién se cuenta con un máximo de 30 años recopilados. Para ello se acudió al Instituto de Meteorología de la Provincia de Villa Clara (INSMET), donde amablemente proporcionaron las cartas pluviográficas mostradas en la figura 3 para su posterior digitalización. Como resultado, se obtuvo la información disponible de los registros de lluvias del pluviógrafo en el período de 1990 a 2019, los cuales fueron transcritos en una hoja de cálculo de Excel.

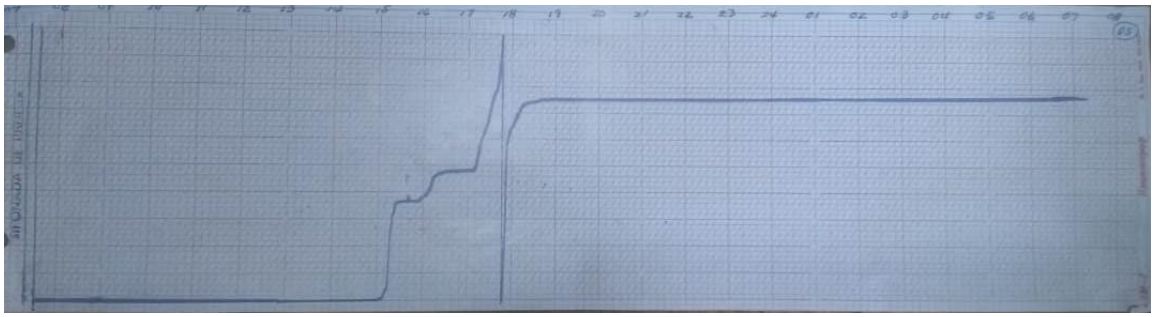

Figura 3. Carta pluviográfica obtenida de la Estación Meteorológica Caibarién, provincia de Villa Clara, Cuba.

De toda la información recopilada se debe generar una tabla con la serie de máximos anuales (SMA) definiéndose como una serie de datos de valores máximos o una instancia extrema con duración crítica para cada año, independientemente de la magnitud de los valores, determinándose el número de valores en un SMA siempre igual al número de años de registro y manteniendo una estrecha relación entre los períodos de retornos (ecuación 1).

$$T_P - \frac{1}{\ln\left(1 - \frac{1}{T_A}\right)} \qquad (1)$$

El período de retorno es el lapso de tiempo que se da entre dos aguaceros que presentan una misma magnitud específica, también tiene en cuenta el carácter aleatorio de la lluvia en el tiempo.

MÉTODO DE IMPUTACIÓN MÚLTIPLE

Para realizar este proceso iterativo y tomar las decisiones más convenientes se utiliza el software SPSS en su versión 25. El procedimiento será la obtención de resultados mediante tres imputaciones aleatorias con Imputación Múltiple (mediante la técnica de regresión lineal) y se escogen los resultados de intensidades máximas más grandes obtenidas en cualquier método, siempre garantizando los siguientes aspectos:

- La media de la serie no puede variar significativamente.
- La varianza y covarianza deben permanecer constantes con un intervalo de error inferior al 1 %.

- Los resultados obtenidos que se pretenden imputar deberán tener un orden lógico de obtención de intensidades en relación con su duración, es decir, las intensidades de 5 min son mayores que las de 10 min y estas, a su vez, mayores que las de 20 min y así consecutivamente.

El procedimiento combina distintos estimadores generados a partir de m imputaciones. Utilizando la notación, se considera una variable $\hat{Q}$ y U el estimador de su varianza. Después de generar m conjuntos de datos mediante simulaciones, se tienen m estimadores de $\hat{Q}$ y de U (Medina et al., 2007).

Existen dos componentes de la varianza de $\hat{Q}$. La varianza de cada imputación

$$\bar{U} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} \hat{U}_i \qquad (2)$$

Y la varianza entre las imputaciones,

$$B = \frac{1}{m-1}\sum_{i=1}^{m}(\hat{Q}_i - \bar{Q})^2 \qquad (3)$$

Donde:

$\hat{U}_i$: Varianza de Q̂ en cada imputación.

$\bar{U}$: Media de las varianzas de Q̂ en todas las imputaciones.

B: Varianza entre las imputaciones, mide cuánto varían las estimaciones Q̂ entre diferentes conjuntos de datos imputados.

m: Número total de conjuntos de datos imputados o el número total de imputaciones realizadas.

Por tanto, la varianza total *(T*) se obtiene sumando las expresiones Ec.2 y Ec.3 corrigiendo el número finito de imputaciones por el valor $\frac{m+1}{m}$

$$T = \bar{U} + \frac{(m+1)}{m}B \qquad (4)$$

La relación $\frac{B}{U}$ tiene relevancia en el contexto de imputación de datos y proporciona una medida de cuánta información está contenida en los datos faltantes en comparación con los datos observados. La relación $\frac{B}{U}$ se puede expresar como $\frac{B}{U} = \frac{\gamma}{1-\gamma}$.

Donde:

γ: es la fracción de datos que está ausente o es faltante.

El intervalo de confianza se obtiene por medio de:

$$\bar{Q} \pm t_{gl}\sqrt{T} \qquad (5)$$

Y los grados de libertad de t se calculan como:

$$gl = (m-1)\left(1 + \frac{1}{r^2}\right) \qquad (6)$$

$$r = \left(1 + \frac{1}{m}\right)\frac{B}{\bar{U}} \qquad (7)$$

DATOS ANÓMALOS

Para el estudio de outliers se descarta la utilización de los métodos de eliminación y remplazo por su susceptibilidad al sesgo y error humano que impide una replicación o revisión rigurosa, abogando por el método que se basa en el uso de técnicas robustas como es el caso del US-WRC recomendado por (Ng et al., 2007) y utilizado en Estados Unidos.

Este método se basa en el principio de la prueba de hipótesis con el supuesto subyacente de log Pearson. Para aplicar este método, deben calcularse los logaritmos decimales de los valores de la

muestra, y se asume que esta nueva serie sigue una distribución normal. Sobre estas series transformadas, se calcula la media $\bar{x}$ y la desviación típica S_y, y a continuación, la prueba de datos dudosos US-WRC, presentando las siguientes ecuaciones que demuestran el umbral de datos dudosos:

$$Y_h = \bar{x} + K_n * S_y \qquad (8)$$
$$Y_l = \bar{x} - K_n * S_y \qquad (9)$$

Donde Y_h y Y_l establecen el umbral de dato dudoso alto y bajo respectivamente; K_n, es un valor tabulado en función del tamaño de la muestra, con un nivel de significancia del 10 % en información normalmente distribuida; S_y, es la desviación estándar y s la desviación típica.

ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE LOS RESULTADOS

Para que los resultados del estudio se adecuen a la realidad, se deben cumplir los estándares de calidad, por lo que las series de datos deberán satisfacer determinados criterios estadísticos, como los de aleatoriedad, independencia, homogeneidad y estacionalidad definidos por (OMM, 2011) y expuestas a continuación en la tabla 1, especificándose que son pruebas del tipo paramétricas.

Tabla 1. Tipos de pruebas de calidad de datos.

Criterios Estadísticos	Prueba recomendada	Intervalo de confianza en %
Aleatoriedad	Prueba de Rachas	95
Independencia	Prueba de Mann-Withney / Wald-Wolfowitz	
Estacionalidad	Pruebas de Mann- Kendall	

Prueba de Mann-Kendall

La hipótesis nula (H0) plantea que una muestra de datos ordenados cronológicamente es independiente y está idénticamente distribuida. El estadístico S se define como sigue:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} sgn(x_j - x_i) \qquad (10)$$

Donde:

$$sgn(x) = \begin{cases} 1 \; si \; x > 0 \\ 0 \; si \; x = 0 \\ -1 \; si \; x < 0 \end{cases}$$

La prueba de Rachas o Wald-Wolfowitz permite verificar la hipótesis nula de que la muestra es aleatoria, es decir, si las sucesivas observaciones son independientes. Este contraste se basa en el número de rachas que presenta una muestra que proporciona un indicio de si hay o no aleatoriedad en la misma. Un número reducido de rachas es indicio de que las observaciones no se han extraído de forma aleatoria. Los elementos de la primera racha proceden de una población con una determinada característica, mientras que los de la segunda proceden de otra población. De forma idéntica, un número excesivo de rachas puede ser también indicio de no aleatoriedad de la muestra (Castillo et al., 2022).

Si la muestra es suficientemente grande y la hipótesis de aleatoriedad es cierta, la distribución muestral del número de rachas, puede aproximarse mediante una distribución normal de parámetros:

$$\mu_R = \frac{2n_1 n_2}{n} + 1 \qquad (11)$$
$$\sigma_R = \sqrt{\frac{2n_1 n_2 (2n_1 n_2 - n)}{n^2 (n-1)}} \qquad (12)$$

Donde n_1 es el número de elementos de una clase; n_2 es el número de elementos de la otra clase y n es el número total de observaciones, R es la suma de los rangos de los elementos de la primera muestra de tamaño p en la serie combinada.

$$Z = \frac{R+c-\mu_R}{\sigma_R} \qquad (13)$$

Donde $c = 0.5\ si\ R < \mu_R\ y\ c = -0.5\ si\ R > \mu_R$

Para comprobar la independencia de la serie de datos se utiliza la prueba de Mann-Whitney, ya que dicha prueba presenta una distribución de datos libres con el objetivo principal de evaluar la diferencia entre los puntajes de una muestra pequeña medidos en dos momentos diferentes, o sea, sirve para verificar que 2 muestras aleatorias autónomas provienen de dos poblaciones iguales o de una misma población.

La prueba de Mann-Whitney toma en consideración las cantidades siguientes:

$$V = R - p\frac{(p+1)}{2} \qquad (14)$$

$$W = p * q - V \qquad (15)$$

Donde V y W son calculados a partir de R, p y q. V representa el número de veces que un ejemplar de la muestra 1 sigue en rango a un ejemplar de la muestra 2; W puede calcularse también de modo análogo para la muestra 2 respecto de la muestra 1 (OMM, 2011).

$$\overline{U} = \frac{p*q}{2} \qquad (16)$$

Y cuya varianza se expresa mediante:

$$\mathrm{Var(U)} = \left|\frac{\mathrm{p*q}}{\mathrm{N(N-1)}}\right| \left|\frac{\mathrm{N^3-N}}{12} - \sum \mathrm{T}\right| \qquad (17)$$

$$T = \frac{\mathrm{j^3-j}}{12} j \qquad (18)$$

Donde T y j son el número de observaciones ligadas a un rango dado. La suma ΣT abarca todos los grupos de observaciones ligadas de ambas muestras de tamaño p y q.

Una vez que se finalizó el análisis estadístico, se efectúa un ajuste a las distribuciones de probabilidad, teniendo en cuenta que estas son usadas en hidrología para predecir con cierta probabilidad los valores que puede tomar una variable hidrológica.

Para ajustar los valores máximos de precipitación de 5, 10, 20, 40, 60, 90, 120, 150, 240, 300, 720, 1440, 2880 y 4320 minutos para diferentes períodos de retorno, se utiliza la distribución de Gumbel o distribución de Valor Extremo Tipo 1, siendo parte de una familia de distribuciones que nacen de una distribución generalizada de valor extremo (GEV) (Maidment et al., 1994).

$$f(x) = exp\left[-(1 - k\frac{x-u}{\alpha})^{1/k}\right] \qquad (19)$$

Para $k = 0$ la distribución de Valor Extremo tipo 1 está dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} exp\left[-\frac{x-u}{\alpha} - \exp\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)\right] \quad -\infty<x<\infty,\ \alpha>0 \qquad (20)$$

Donde u y α son parámetros de forma y localización, respectivamente.

Los estimadores calculados mediante el método de los momentos son asintóticamente eficientes, en particular al tratarse de distribuciones asimétricas, que son las más usuales en hidrología. Esta eficiencia permite que este método se use en muchos casos como una primera aproximación en la estimación de los parámetros, ya que permite obtener estimaciones de tal modo que los momentos teóricos de una distribución, concuerden con los momentos de la muestra calculados (Acosta Castellanos, 2018).

$$\overline{x} = u + 0{,}5772 * \alpha \quad (21)$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} Sx \quad (22)$$

Dónde: *Sx* = Desviación estándar de la muestra $\overline{x}$ = Media aritmética de la muestra (Acosta Castellanos, 2018).

Las ecuaciones para su cálculo son:

$$\lambda 1 = \beta o \quad (23)$$

$$\lambda 2 = 2\beta 1 - \beta o \quad (24)$$

$$\lambda 3 = 6\beta 2 - 6\beta 1 + \beta o \quad (25)$$

$$\lambda 4 = 20\beta 3 - 30\beta 2 + 12\beta 1 - \beta o \quad (26)$$

El momento lineal de primer orden (*λ1*) es la media de la variable; el segundo momento (λ2) se refiere a la escala de distribución en el que se indica el grado de dispersión de los datos; el momento lineal de tercer orden (λ3) representa la asimetría; por último, el cuarto momento lineal (λ4) se refiere al apuntamiento (también llamado curtosis) que mide cuán escarpada o achatada está la distribución de los datos.

Los estimadores β se calculan mediante las expresiones:

$$\beta_0 = n^{-1} \sum_{j=1}^{n} x_{jn} \quad (27)$$

$$\beta_2 = n^{-1} \sum_{j=2}^{n} \frac{(j-1)}{(n-1)} x_{jn} \quad (28)$$

$$\beta_3 = n^{-1} \sum_{j=3}^{n} \frac{(j-1)(j-2)}{(n-1)(n-2)} x_{jn} \quad (29)$$

Donde *n* es el número de datos de cada serie; *J* es el número de orden de cada dato ordenado de menor a mayor; X_{jn}, es el dato *j*-ésimo de la serie de *n* datos.

Para lograr el desarrollo de los aspectos anteriores se pueden complementar la información con las opciones que brinda el software Hidroesta 2, planteándose el siguiente procedimiento:

En la opción distribuciones, escoger la distribución a la cual desea ajustar la SMA.

Se ingresan los datos de manera manual o en las opciones para importar la información de una hoja de excel o access una base datos existentes.

Se define el tipo de ajuste entre parámetros ordinarios y momentos lineales con un nivel de significancia que varía desde el 1 % al 20 %.

Se calcula la serie de datos en la opción calcular para determinar si el delta teórico es menor que el delta tabular y si los datos se ajustan a la distribución escogida con un nivel de significancia determinado.

Para concluir, se introduce el período de retorno en el cual se piensa trabajar y se calcula Q=f (T) para obtener el caudal calculado para dicho periodo de retorno, solo falta emitir un reporte de la información.

Para evitar el uso inadecuado de los estadísticos de prueba, se dispone de la prueba de Kolmogorov-Smirnov determinando si es o no razonable concluir que el conjunto de observaciones dado ha sido obtenido de una familia de distribuciones en particular (OMM, 2011).

Este procedimiento es un test no paramétrico que permite probar si dos muestras provienen del mismo modelo probabilístico. Supóngase que se tienen dos muestras de tamaño total N=m+n compuestas por observaciones x1, x2, x3…, xn e y1, y2, y3…, ym. El test supone que las variables x y y son mutuamente independientes, que cada x proviene de la misma población continua P1 y que las variables y provienen de otra población continua P2. La hipótesis nula es que ambas distribuciones son idénticas, es decir, son dos muestras de la misma población (García, 2022). El test se basa en calcular el estadígrafo J definido como el valor máximo de la diferencia absoluta entre dos funciones de distribución acumulada.

La prueba no precisa que las observaciones sean agrupadas y se usan en cualquier muestra de cualquier tamaño (Maity, 2018), por lo que muestra su superioridad con respecto a la prueba Chi-cuadrado (X2), su facilidad de cálculo ya que no usa una agrupación de datos, además de que el estadístico es independiente de la distribución de frecuencia esperada, solo depende del tamaño de la muestra.

La prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov (figura 6) compara el máximo valor absoluto de la diferencia D entre la función de distribución de probabilidad observada F0 (xm) y la estimada F (xm) con un valor crítico (d) que depende del número de datos y el nivel de significancia seleccionado (Zagalo et al., 2020).

$$D = máx[F_0(Xm) - F(Xm)] \qquad (30)$$

Donde $F_0(Xm)$ es la función de distribución empírica de la muestra; $F(Xm)$ es la función de distribución teórica de la población que se quiere contrastar y *D* es el estadístico definido en la expresión.

Si *D* < *d*, se acepta la hipótesis nula, es decir, se acepta la función de distribución de probabilidad. Para esta prueba, la función de distribución de probabilidad observada se calcula mediante:

$$F_0(Xm) = 1 - \frac{m}{n+1} \qquad (31)$$

Donde *m* es el número de orden del dato X_m en una lista de mayor a menor y *n* es el número total de datos.

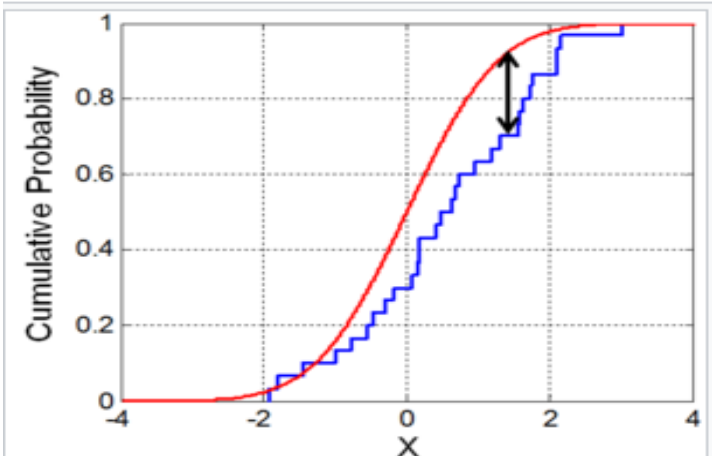

Figura 6. Representación estadística de la prueba de Kolmogorov-Smirnov.

AJUSTE DE CURVAS IDF

Los resultados del análisis de frecuencias se expresan generalmente en términos de las relaciones intensidad-duración-frecuencia en un lugar dado, o se exponen en forma de atlas de frecuencia de precipitación, en los que se indican las alturas acumuladas de precipitación de lluvia para distintas duraciones y períodos de retorno en la región de interés (OMM, 2011).

Sherman (1931) propuso una parametrización que en la actualidad se adopta en todo el mundo, siendo la representación matemática y gráfica del cálculo de curvas IDF. Esta formulación es una ecuación racional del tipo:

$$i_d^T = f(x) = \frac{P(T)}{Q(d)} \qquad (32)$$

El numerador *P*(*T*) es función del período de retorno (*T*) e indica el cuantil para la frecuencia acumulada (1-1/*T*) de una función de distribución de probabilidad de una variable aleatoria. Luego según Alfonso et al., (2019), se hicieron estudios donde el denominador que es en función del tiempo, se admite que puede expresarse como un polinomio que permite factorización, comúnmente llamado factor de escala y queda la siguiente parametrización general:

$$i_d^T = \frac{kT^m}{(d^\theta + C)^n} \qquad (33)$$

Donde i_d^T es la intensidad media de precipitación de una hora y período de retorno de *T* años; d es la duración e i_d^T es la intensidad máxima de precipitación para una duración de *T* (Balbastre Soldevila, 2018).

03 CURVAS IDF PARA LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE CAIBARIÉN

RECOPILACIÓN DE DATOS

En colaboración con el Instituto de Meteorología de la Provincia de Villa Clara (INSMET) se obtienen las series de intensidades máximas de la estación meteorológica de Caibarién en un período de 30 años, información disponible de los registros de lluvias del pluviógrafo entre los años de 1990 a 2019, solo produciéndose ausencias de datos en los años 2004, 2012, 2017, 2018 y 2019. De la información obtenida, se logra obtener la serie de máximos anuales en rangos horarios de 5, 10, 20, 40, 60, 90,

120, 150, 240, 300 y 720 y el pluviómetro suministró la información para los rangos horarios de 1440, 2880 y 4320 sin presencia de datos faltantes. (tabla 2).

Tabla 2. Serie de intensidades de Máximos anuales en rangos horarios de 5, 10, 20, 40, 60, 90, 120, 150, 240, 300,720,1440,2880 y 4320 minutos (muestra).

Año	5 min	10 min	20 min	40 min	60 min	90 min	120 min	150 min	240 min	300 min	720 min	1440 min	2880 min	4320 min
1990	2,00	2,00	1,42	1,17	0,96	0,67	0,51	0,40	0,25	0,20	0,09	0,04	0,03	0,02
1991	2,33	2,00	1,50	1,13	0,85	0,64	0,48	0,39	0,27	0,24	0,09	0,05	0,04	0,03
1992	1,67	1,20	1,00	0,96	0,71	0,51	0,40	0,33	0,21	0,17	0,09	0,05	0,03	0,03
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
2011	2,00	1,84	1,50	1,04	0,78	0,57	0,48	0,39	0,25	0,22	0,13	0,07	0,06	0,04
2012												0,09	0,05	0,04
2013	2,00	1,84	1,45	0,94	0,86	0,60	0,46	0,37	0,24	0,21	0,17	0,06	0,05	0,03
2014	2,00	2,00	1,75	1,24	0,87	0,67	0,57	0,46	0,29	0,23	0,10	0,05	0,03	0,02
2015	2,00	2,00	1,50	1,25	0,96	0,66	0,51	0,42	0,28	0,23	0,44	0,05	0,03	0,02
2016	2,00	1,50	1,25	0,91	0,76	0,67	0,58	0,49	0,33	0,26	0,13	0,07	0,04	0,02
2017												0,24	0,15	0,10
2018												0,10	0,10	0,09
2019												0,07	0,04	0,04

DATOS FALTANTES

Diferentes factores que influyen en la pérdida de datos o la inexistencia de estos, en la estación pluviográfica se ven afectados los años 2004, 2012, 2017, 2018 y 2019, por lo que no se logran obtener los valores de intensidades máximas anuales de la lluvia. Para revelar las carencias provocadas por estos datos ausentes, se utiliza el método de Imputación múltiple con ayuda del software estadístico SPSS, con un máximo de 30 iteraciones obteniendo, a criterio del autor, los promedios para cada año faltante se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Resultados de la imputación de valores a los datos faltantes de los años 2004, 2012, 2017, 2018 y 2019 para duraciones de 5, 10, 20, 40, 60, 90, 120, 150, 240, 300 y 720 minutos.

Tiempo (min)	Valores Imputados 2004	Valores Imputados 2012	Valores Imputados 2017	Valores Imputados 2018	Valores Imputados 2019
5	2,275	1,659	2,104	1,755	1,592
10	1,917	1,486	1,808	1,538	1,415
20	1,529	1,267	1,464	1,279	1,241
40	1,163	0,938	1,101	0,939	0,882
60	0,908	0,709	0,857	0,701	0,725
90	0,691	0,522	0,644	0,505	0,503
120	0,553	0,419	0,513	0,417	0,411
150	0,454	0,339	0,419	0,338	0,332
240	0,317	0,215	0,280	0,220	0,221
300	0,254	0,173	0,229	0,179	0,184
720	0,169	0,166	0,144	0,172	0,200

DATOS ANÓMALOS

La aplicación del método US-WRC (figura 7) muestra como ninguno de los datos a comprobar (línea azul) supera el límite superior (línea naranja) arrojando como resultado una ausencia total de datos anómalos en la serie de datos.

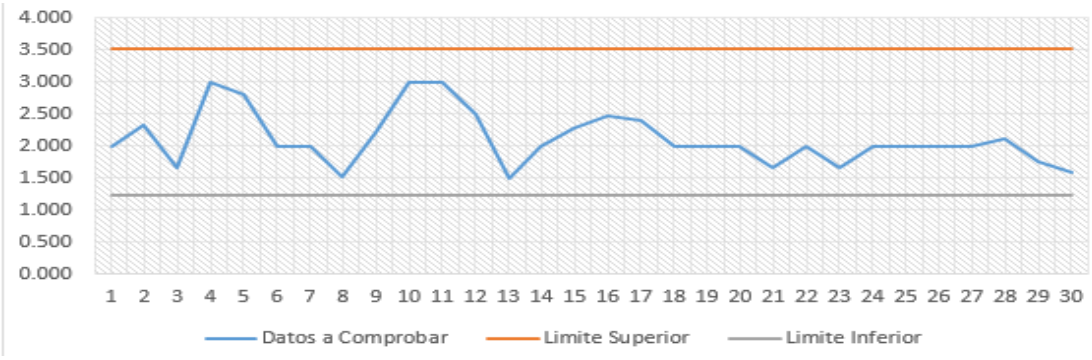

Figura 7. Gráfica representativa del método US-WRC para una duración de 5 min. Fuente: Elaboración propia

CALIDAD DE DATOS

Los resultados de las pruebas de calidad aplicadas a las series de máximos anuales, Rachas, Mann-Whitney (M-W), Wald-Wolfowitz (W-W) y Mann-Kendall (M-K) se resumen de la forma siguiente:

- Las series son aleatorias para un nivel de significancia del 5 % (Prueba de Rachas /W-W).
- Las series son independientes para un nivel de significancia del 5 % (Pruebas M-W).
- Las series son estacionales para un nivel de significancia del 5 % (Prueba de M-K).

Luego de realizar el estudio y comprobar que todas las series son estacionales, se investiga sobre las tendencias de dichas series, para ello se grafican los resultados observados en la figura 8 demuestran que las series datos para la elaboración de las curvas IDF de la estación meteorológica de Caibarién, son aptas para su procesamiento probabilístico, destacando que se pueden usar modelos estacionarios para su representación, sin necesidad de acudir a modelos no estacionarios.

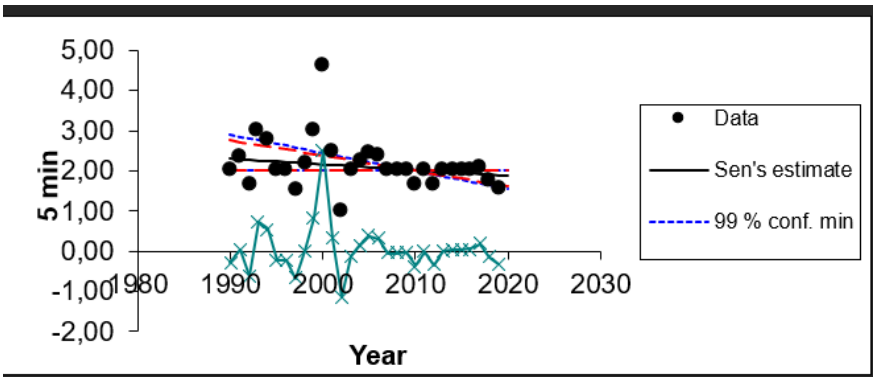

Figura 8. Análisis de tendencia para la serie de 5 minutos cuya pendiente fue de las más elevadas de las series estudiadas.

Los resultados obtenidos de las diferentes pruebas de calidad demuestran que las series datos para la elaboración de las curvas IDF de la estación meteorológica de Caibarién, son aptas para su procesamiento probabilístico.

DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD

La tabla 4 muestra los resultados de los parámetros de posición y escala obtenidos del análisis de distribución de Gumbel (ξ=0) con ajuste por L-momentos para 5, 10, 20, 40, 60, 90, 120, 150, 240, 300, 720, 1440, 2880 y 4320 minutos.

Tabla 4 Parámetros de la distribución de probabilidad de Gumbel obtenidos para las series de 5, 10, 20, 40, 60, 90, 120, 150, 240, 300, 720, 1440, 2880 y 4320 minutos.

Serie	Parámetro de posición	Parámetro de Escala
5 min	1,9018	0,4357
10 min	1,6404	0,3422
20 min	1,3449	0,255
40 min	0,9833	0,2405
60 min	0,7655	0,1884
90 min	0,5731	0,15
120 min	0,3694	0,1077
150 min	0,3694	0,1077
240 min	0,2416	0,0833
300 min	0,1971	0,0676
720 min	0,1116	0,055
1440 min	0,0621	0,0287
2880 min	0,0411	0,0196
4320 min	0,0307	0,0139

TEST DE BONDAD DE AJUSTE DE KOLMOROGOV-SMIRNOV.

Para la obtención de la función de probabilidad de mejor ajuste se realiza el test de bondad de ajuste de Kolmorogov-Smirnov lo cual, como el delta teórico, es menor que el delta tabular los datos se ajustan a la distribución Gumbel, con un nivel de significación del 5 %. (tabla 5)

Tabla 5. Prueba de Kolmorogov-Smirnov desarrollada en el software Hidroesta 2.

M	X	P(X)	G(Y)Ordinario	G(Y) Mom Lineal	Delta
1	1,0	0,0323	0,0031	0,0004	0,0291
2	1,52	0,0645	0,1329	0,0905	0,0684
3	1,6	0,0968	0,1745	0,1304	0,0778
4	1,66	0,129	0,2176	0,1743	0,0886
5	1,67	0,1613	0,2252	0,1823	0,064
6	1,67	0,1935	0,2252	0,1823	0,0317
7	1,75	0,2258	0,285	0,2465	0,0592
8	2,0	0,2581	0,4652	0,4501	0,2071
9	2,0	0,2903	0,4652	0,4501	0,1749
10	2,0	0,3226	0,4652	0,4501	0,1426
11	2,0	0,3548	0,4652	0,4501	0,1104
12	2,0	0,3871	0,4652	0,4501	0,0781
13	2,0	0,4194	0,4652	0,4501	0,0459
14	2,0	0,4516	0,4652	0,4501	0,0136
15	2,0	0,4839	0,4652	0,4501	0,0187
16	2,0	0,5161	0,4652	0,4501	0,0509
17	2,0	0,5484	0,4652	0,4501	0,0832
18	2,0	0,5806	0,4652	0,4501	0,1154
19	2,0	0,6129	0,4652	0,4501	0,1477
20	2,1	0,6452	0,5377	0,5331	0,1075
21	2,2	0,6774	0,6230	0,6039	0,0775
22	2,28	0,7097	0,6447	0,6541	0,065
23	2,33	0,7419	0,6751	0,6878	0,0668
24	2,4	0,7742	0,7110	0,7271	0,0632
25	2,46	0,8065	0,7401	0,7585	0,0663
26	2,49	0,8387	0,7559	0,7753	0,0828
27	2,79	0,871	0,8584	0,8720	0,0125
28	3,0	0,9032	0,9035	0,9227	0,0030
29	3,0	0,9355	0,9035	0,9227	0,032
30	4,67	0,9677	0,9965	0,9982	0,0288

AJUSTE A UNA FUNCIÓN PARAMÉTRICA IDF

La aplicación del modelo Montana para el ajuste de las intensidades de la serie de máximos anuales de la estación meteorológica del Caibarién se resumen en la tabla 8 y los valores de k, m, θ, C y n se expresan en la tabla 9 obtenidos en el Software Matlab.

Tabla 8. Valores del modelo Montana.

	Tiempo (min)													
	5	**10**	**20**	**40**	**60**	**90**	**120**	**150**	**240**	**300**	**720**	**1440**	**2880**	**4320**
2 años	2,13	1,86	1,50	1,10	0,88	0,68	0,56	0,48	0,34	0,28	0,16	0,09	0,05	0,04
3 años	2,27	1,98	1,60	1,17	0,94	0,73	0,60	0,51	0,36	0,30	0,17	0,09	0,06	0,05
5 años	2,46	2,14	1,73	1,27	1,02	0,79	0,65	0,55	0,39	0,33	0,19	0,10	0,07	0,05
10 años	2,74	2,39	1,93	1,42	1,14	0,88	0,73	0,62	0,43	0,36	0,22	0,12	0,08	0,06
20 años	3,06	2,66	2,15	1,58	1,27	0,98	0,81	0,69	0,48	0,41	0,26	0,14	0,09	0,07
25 años	3,17	2,76	2,23	1,64	1,31	1,02	0,84	0,71	0,50	0,42	0,28	0,15	0,10	0,08
30 años	3,26	2,84	2,29	1,69	1,35	1,05	0,86	0,74	0,52	0,43	0,29	0,16	0,10	0,08
50 años	3,53	3,08	2,48	1,83	1,46	1,14	0,93	0,80	0,56	0,47	0,32	0,18	0,11	0,09
75 años	3,76	3,28	2,65	1,95	1,56	1,21	1,00	0,85	0,60	0,50	0,35	0,19	0,12	0,10
100 años	3,93	3,43	2,77	2,04	1,63	1,27	1,04	0,89	0,62	0,52	0,38	0,21	0,13	0,10

Tabla 9. Valores de k, m, θ, y m

Parámetros a Estimar	Menores de 360 min	Mayores de 360 min
C	20,49	6,57
θ	0,90	0,35
k	47,20	0,42
m	0,16	0,22

Se grafican las curvas IDF obtenidas con el modelo de Montana y para profundizar más en el comportamiento del modelo se hace necesario convertir las curvas IDF en curvas de Precipitación-Duración-Frecuencia (PDF) con lo cual se puede obtener el residuo del modelo y se puede apreciar con claridad el rango de validez del mismo. En la Figuras 9 y 10 se muestra un gráfico donde se muestra el modelo de Montana ajustado a los datos obtenidos por el modelo probabilístico de Gumbel para valores menores y mayores de 360 minutos respectivamente.

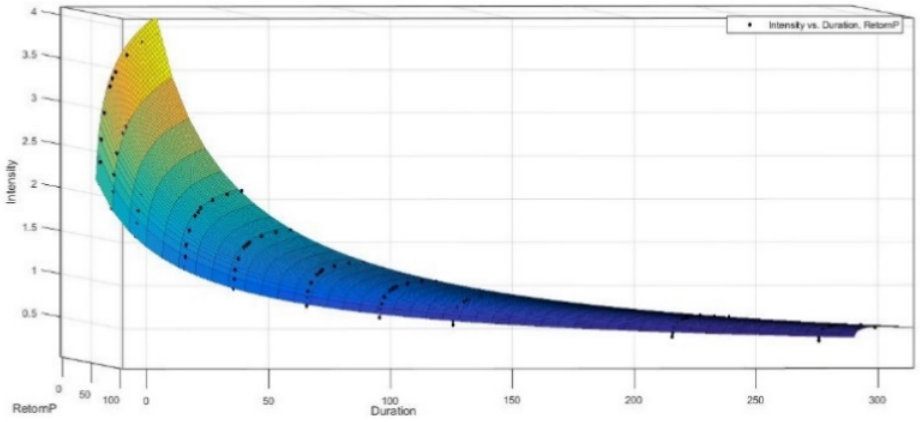

Figura 9: Modelo de Montana ajustado a los datos obtenidos por el modelo probabilístico de Gumbel para menores de 360 minutos.

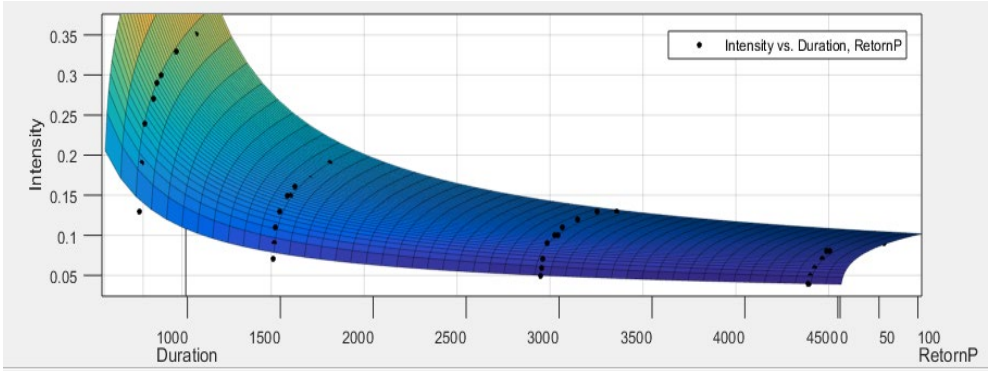

Figura 10 Modelo de Montana ajustado a los datos obtenidos por el modelo probabilístico de Gumbel para mayores de 360 minutos.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON LA NC 1239-2018

Los resultados obtenidos se sometieron a una comparación con la NC 1239-2018 para observar las diferencias por exceso entre cada una, arrojando los siguientes resultados en las figuras 11 y 12.

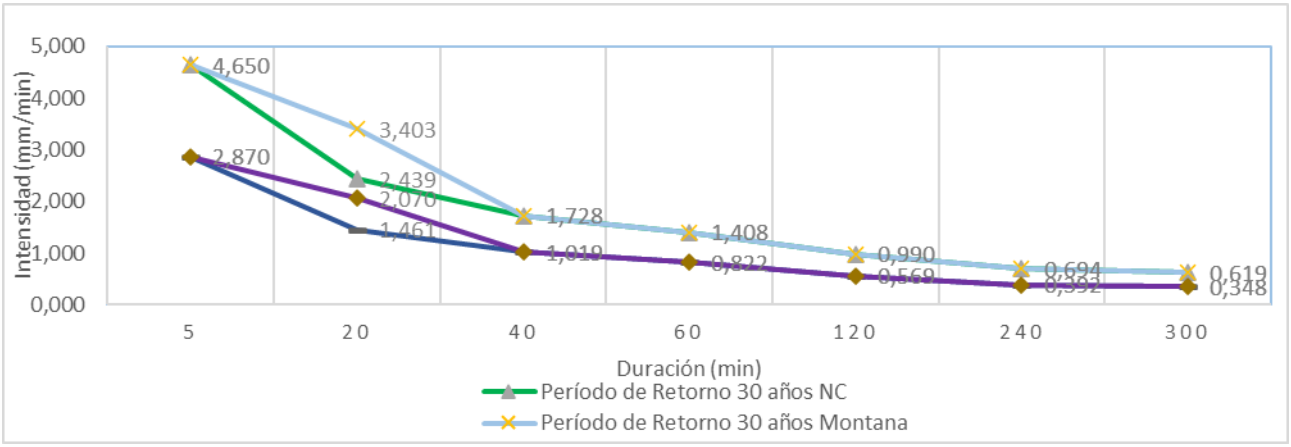

Figura 11: Diferencia de los resultados obtenidos y la NC 1239-2018 para duraciones menores de 40 minutos.

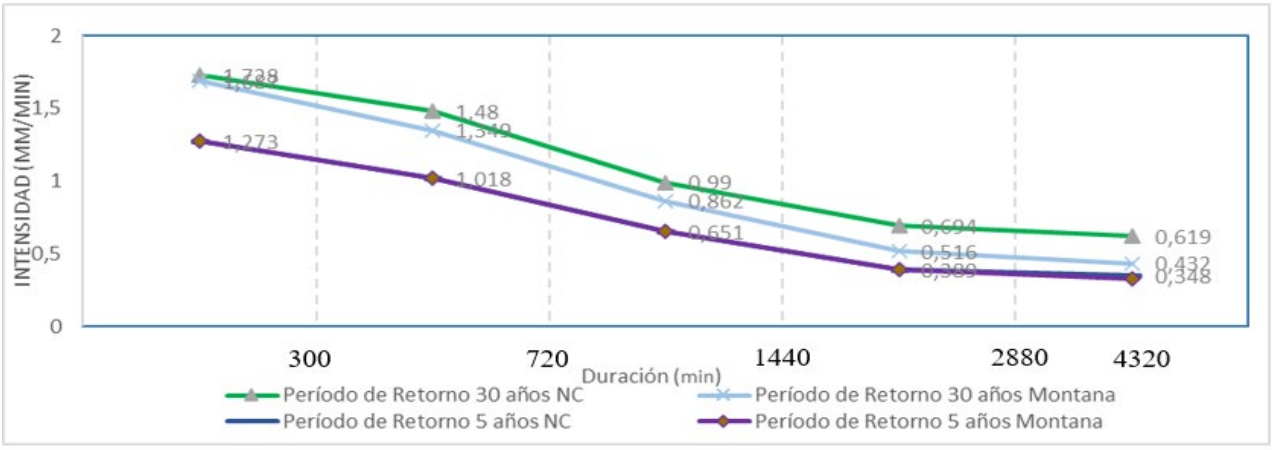

Figura 12: Diferencia de los resultados obtenidos y la NC 1239-2018 para duraciones mayores de 40 minutos. 720,1440,2880 y 4320

04 CONCLUSIONES

Se desarrolló un análisis de formas de proceder en estudios similares a nivel nacional e internacional que permitió determinar la mejor metodología a aplicar en la realización de curvas IFD, definiendo la calidad del resultado, ya que la misma abarca un amplio conjunto de métodos analíticos y matemáticos.

Se define un diagrama de flujo de trabajo a aplicar para la elaboración en este tipo de investigación que sirve de precedente para estudios similares en la provincia.

Se aplicaron técnicas estadísticas para comprobar la bondad de ajuste y la calidad de la serie de datos, logrando satisfacer determinados criterios estadísticos como los de aleatoriedad, independencia y estacionalidad.

Los resultados de esta investigación expresan datos desarrollados a través del método de Montana que al ser comparados con la NC 1239-2018.

05 REFERENCIAS

Acosta Castellanos P. (2018). Estimación de curvas intensidad, duración y frecuencia (idf) en puntos geográficos sin registro históricos de precipitación. Universidad Santo Tomás. Colombia. https://repository.usta.edu.co/handle/11634/19947

Alfonso, G. L. y Raisa B. R. (2019). Ajuste de curvas IDF a partir de tormentas de corta duración. Tecnología y ciencias del agua, 10, 1-24. ISSN electrónico: 2007-2422. México. https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-06-01

Balbastre Soldevila R. (2018). Análisis comparativo de metodologías de cálculo de tormentas de diseño para su aplicación en hidrología urbana. Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Valencia. España. http://hdl.handle.net/10251/100090

Castillo C., Domínguez I., Martínez Y. y Abreu D. (2022). Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia para la ciudad de Santa Clara, Cuba. Tecnologías y Ciencias del Agua. ISSN electrónico: 2007-2422. México. https://doi.org/10.24850/j-tyca-15-1-9

Chow V T, Maidment D. R., Mays L. y Larry W. (1994). Hidrología aplicada. Editorial: McGraw-Hill. ISBN:958-600-171-7. http://library.lol/main/ADE754726A4CEF30F5E65448C57D586A

Maity R. (2018). Statistical methods in hydrology and hydroclimatology (Vol. 555). Springer. ISSN: 2363-7633.India. https://doi.org/10.1007/978-981-16-5517-3

Medina F. y Galván M. (2007). Imputación de datos: teoría y práctica. Publicación de las Naciones Unidas. S.07. II. G.109. https://repositorio.cepal.org/handle/11362/4755

Ng W. W., Panu U. S. and Lennox W. C. (2007). Chaos based Analytical techniques for daily extreme hydrological observations. Journal of Hydrology, 342(1), 17-41. ISSN: 1879-2707. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.04.023

NC: 1239-2018 (2018) Especificaciones para el diseño de alcantarillado sanitario y drenaje pluvial. Oficina Nacional de Normalización, La Habana, Cuba.

OMM. (2011). Guía de Prácticas Hidrológicas: Gestión de recursos hídricos y aplicación de prácticas hidrológicas (Sexta edición ed., Vol. II). https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10038

Thiombiano A. N., El Adlouni S., St-Hilaire A., Ouarda T. B. M. J. and El-Jabi N. (2017). Nonstationary frequency analysis of extreme daily precipitation amounts in Southeastern Canada using a peaks-over-threshold approach. Theoretical and Applied Climatology, 129(1), 413-426. ISSN: 1434-4483 .https://doi.org/10.1007/s00704-016-1789-7

Zagalo S. A., Omaida S., Miguel P. M., y C C. C. L. (2020). Modelo matemático para estimar curvas de intensidad, duración y frecuencia de lluvias extremas en Tunja, Colombia. Información tecnológica, 31(1), 193-206. https://doi.org/10.4067/S0718-07642020000100193

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Ismabel Domínguez Hurtado. https://orcid.org/0000-0002-7841-8031

Suministró los datos necesarios para el desarrollo de la investigación.

Carlos Lázaro Castillo García. https://orcid.org/0000-0002-6430-2775

Realizó la tutoría de la investigación, análisis de los resultados y en la revisión y redacción del informe final.

José Alejandro Solís Quintana. https://orcid.org/ 0009-0003-4777-605X

Trabajó en el procesamiento de los datos, su análisis e interpretación. Participó en la búsqueda de información y en la redacción final.

Análisis de Envolvente de Datos: herramienta para evaluar eficiencia en el regadío cubano.

Rafael Miguel Pacheco Moya E-MAIL: rpacheco@uo.edu.cu
Departamento de Ingeniería Hidráulica. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba.

Pável Vargas Rodríguez E-MAIL: pvargas@uo.edu.cu
Departamento de Ingeniería Hidráulica. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba.

RESUMEN

Mejorar la eficiencia en la aplicación del agua de riego, debido a su escasez, es una cuestión que preocupa a todos los decisores del país pues no es posible seguir gestionando el preciado líquido con las pautas actuales. Estudiar la eficiencia de riego en la agricultura cubana como una combinación de recursos va a permitir conocer donde la aplicación del agua va a suponer un mayor beneficio, siempre en combinación con otros recursos empleados en el proceso de producción. En este contexto, resulta conveniente el empleo de técnicas no paramétricas como el análisis envolvente de datos, dado su flexibilidad y capacidad de manejar las particularidades productivas de las entidades. El análisis de los regadíos mediante DEA, permitirá evaluar donde la gestión del agua se realiza de una forma más eficiente.

PALABRAS CLAVES: combinación de recursos, eficiencia, gestión del agua de riego, programación lineal, regadío cubano.

Data Envelopment Analysis: a tool to evaluate irrigation efficiency in cuban irrigation.

ABSTRACT

Improving efficiency in the application of irrigation water, due to its scarcity, is a matter of concern to all decision-makers in the country, since it is not possible to continue managing the precious liquid with current guidelines. Studying the efficiency of irrigation in Cuban agriculture as a combination of resources will allow us to know where the application of water will be of greater benefit, always in combination with other resources used in the production process. In this context, the use of non-parametric techniques such as data envelopment analysis is convenient, given its flexibility and ability to handle the productive characteristics of entities. The analysis of irrigation by means of DEA, will allow to evaluate where the management of the water is carried out in a more efficient way.

KEYWORDS: combination of resources, efficiency, irrigation water management, linear programming, Cuban irrigation.

CITMA CERTIFICADO

Marzo 2023-RECIBIDO *APROBADO Marzo 2024*

Esta obra está bajo una licencia internacional creative commons attribution-noncommercial 4.0

SciELO

01 INTRODUCCIÓN

La agricultura de regadío consume alrededor del 70% del agua utilizada para usos consuntivos, la cual es gestionada de manera deficiente. “Eficiencia” en la gestión debe ser la palabra clave para los administradores de riego. Se requiere eficiencia en todas sus operaciones para que la sustracción de agua del subsuelo se mantenga en un mínimo, se puedan mantener ríos y mantos freáticos para el ambiente y el agua se entregue donde, cuando y en la cantidad requerida (Altamirano et al. 2019).

La mayoría de los sistemas de regadío del mundo están funcionando por debajo de su capacidad y no se ajustan a las necesidades de la agricultura actual (Olmedo 2017). El bajo nivel de productividad del agua asociado a la gestión de estos sistemas conlleva menores oportunidades de usar eficazmente los recursos y obtener rendimientos económicos.

Cuba no está ajena a esta situación, según Cisneros et al. (2011) haciendo referencia a Alemán et al. (2003) la baja eficiencia en la operación de los sistemas de riego constituye uno de los problemas más agudos que afectan a las áreas bajo riego, no basta con seguir instalando nuevos sistemas de riego cada año, sin alcanzar un nivel mínimo de eficiencia en el área bajo riego actual (González et al. 2004). Por tal razón, toda metodología o recomendación dirigida a la optimización en el aprovechamiento de los recursos hídricos y a la preservación del medio ambiente, adquiere un valor inmenso para las zonas bajo riego.

Dada la importancia del riego en la producción de alimentos, el alto porcentaje de agua utilizado en la agricultura y los problemas relacionados con su gestión, resulta pertinente estudiar el riego en Cuba desde un marco integral, con un enfoque en la eficiencia de sus sistemas operadores como entes ya sean productivos o de servicio.

En Cuba, desde el 2020 se ha retomado con gran fuerza el concepto de eficiencia en todos los sectores de la economía. Hoy en día, en el marco de un proceso de recuperación económica tras la pandemia de COVID-19, la tendencia al incremento en la asignación de recursos al sector agrícola se mantiene, con lo que se refuerza la importancia de velar por la eficiencia en este sector. Sin embargo, existen en el país pocas evidencias acerca de la eficiencia que alcanzan las áreas bajo riego, debido a ello el conocimiento y la aplicación de técnicas de evaluación de la relación recursos-resultados resulta de singular importancia.

El concepto de eficiencia, aplicado a las áreas de riego en Cuba, implicaría que éstas obtengan una determinada producción agrícola minimizando el consumo de recursos como agua, mano de obra, insumos, etc. Un área de riego será considerada relativamente eficiente si no existe ninguna otra tecnológicamente similar en la muestra que obtenga el mismo valor de la producción bruta utilizando menos de algún factor productivo y no más de los restantes (eficiencia en términos de inputs o entradas). Por tanto, una mejor gestión del regadío, por lo general, requeriría introducir políticas destinadas al aumento de la eficiencia de los inputs, entre ellos principalmente el agua, puesto que "se puede lograr más con menos agua" a través de una mejor gestión.

Un método apropiado para evaluar la eficiencia productiva de las áreas de riego es el método de análisis de envolvente de datos (DEA, por sus siglas en inglés). La metodología DEA, es utilizada para evaluar la eficiencia relativa de un conjunto de unidades productivas, utilizando un procedimiento no paramétrico que maneja una técnica de programación lineal. Con una serie de entradas (inputs) y salidas (outputs) para cada área de riego; con la finalidad de alcanzar la optimización de sus recursos y con el propósito de conocer objetivamente su realidad, y considerar las medidas a tomar para corregir ineficiencias en las áreas de riego que la presenten.

Este artículo tiene como propósito profundizar en las bases conceptuales y alcance de las técnicas DEA, cuya aplicación en los últimos años se ha extendido al sector agrícola para conocer la eficiencia relativa de cada zona irrigada, y que sería muy factible aplicarla en el país para saber cuál sería la situación óptima de cada zona de riego con el propósito de mejorar la gestión del agua de riego y elevar su productividad para obtener mayores ingresos económicos.

02 FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS

El Análisis de Envolvente de Datos es una metodología basada en modelos de programación lineal, propuesta por primera vez en 1978 por Charnes, Cooper y Rhodes, para estudiar la eficiencia relativa de un conjunto de unidades productivas, utilizando un procedimiento no paramétrico (Charles et al. 1978). Los autores desarrollaron dicha técnica veinte años después a partir de las investigaciones de Farrel (1957), quién proporciona una medida satisfactoria de eficiencia productiva que tiene en cuenta todos los Inputs (recursos empleados) y muestra como puede ser calculada.

El DEA comenzó con la tesis de Edwardo Rhodes, en la Carnegie Mellon University en Pittsburgh, dirigida por W. W. Cooper. Rhodes trabajaba en la evaluación de programas educacionales para estudiantes desaventajados que se aplicaban en escuelas públicas de los Estados Unidos y eran subvencionadas por el Gobierno Federal. El problema consistía en evaluar la eficiencia relativa de una serie de escuelas, considerando para la misma, que llevaba aparejado el manejo de múltiples parámetros de entrada y salida, sin emplear las técnicas tradicionales utilizadas hasta la fecha, fundamentadas esencialmente en modelos económicos de estudios en los precios (Aparicio 2007). La respuesta a este problema representó la primera formulación matemática del DEA, en su variante CCR según las iniciales de sus autores (Charnes, Cooper y Rhodes).

El DEA surge como una técnica para evaluar la eficiencia de una serie de elementos, denominados usualmente unidades de toma de decisión (DMU, pssi), empleándose para dicha evaluaciones múltiples entradas y salidas para cada una de las DMU consideradas. Las mismas deben ser comparables: tanto sus entradas como sus salidas deben ser medibles en unidades homogéneas para todas ellas. Dicho término permite referirse a un grupo amplio de unidades organizacionales que pueden ser personas, regionales de una organización, empresas, entes territoriales e incluso países.

Según Cooper et al. (2004), DEA ha abierto la posibilidad de que se emplee en los casos que han sido resistentes a otros métodos, debido a la compleja naturaleza (a menudo desconocida) de las relaciones entre las múltiples entradas y salidas que participan en muchas de estas actividades, las técnicas DEA presentan la ventaja de que no requieren asumir una forma determinada de función de producción, como ocurre en el caso de las fronteras estocásticas además de permitir un estudio con varios outputs, pero en cambio presenta algunas limitaciones, especialmente se puede citar que no contempla el error aleatorio de los datos, que en el caso de la agricultura puede llegar a ser significativo (Rodríguez 2003).

El Análisis Envolvente de Datos ha supuesto un enfoque alternativo a los planteamientos paramétricos clásicos del análisis de fronteras de producción. A diferencia de estos, cuyo objetivo es el ajuste a unos datos mediante herramientas estadísticas de una forma funcional previamente especificada, con las técnicas DEA se optimiza para cada DMU un modelo de programación matemática con el propósito de estimar una frontera lineal a trozos, determinada por las DMU eficientes en el sentido de Pareto; es decir, aquéllas no dominadas (Aparicio 2007) (ver la figura 1, donde las DMU vienen representadas por puntos en el plano en el caso de un input [X] y un output [Y]).

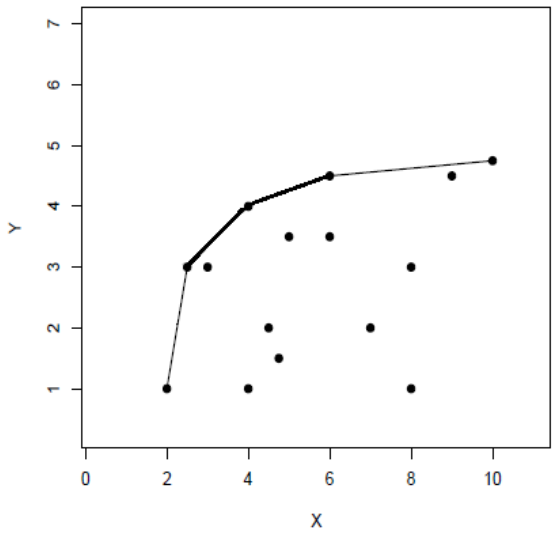

Figura 1. Esquema de un modelo DEA

Según Aparicio (2007), en DEA no se requiere de ninguna hipótesis sobre la forma funcional, ni tampoco sobre la distribución de los errores. Simplemente se calcula una medida de eficiencia relativa a una frontera "extrema", lineal, construida a partir de las observaciones muestrales, con la única condición de que todas las DMU queden envueltas por arriba por dicha frontera (figura 1), conocida a veces como frontera de mejores prácticas. La idea es detectar que unidades de la muestra están situadas sobre esa frontera de mejores prácticas. Detectar que unidades lo están haciendo mejor. Mejor en el sentido de consumir pocas (X) y producir muchas (Y). Por otro lado, una de las particularidades de las técnicas DEA sobre cualquier otra relación de eficiencia, radica en que los pesos asignados vienen determinados por la resolución del modelo.

En el caso del riego, con el uso de las técnicas DEA se puede evaluar el grado de pericia con que una unidad de riego (zona regable) lleva a cabo el proceso técnico de conversión de los inputs en outputs, comparando para ello su actividad con la de otras unidades de la muestra que, siendo tecnológicamente homogéneas, son eficientes relativamente. En resumen, el método DEA determinaría como eficientes a aquellas unidades de riego que, en términos relativos, consuman menos inputs (agua, mano de obra, insumos, energía) para un nivel de output (valor de la producción) dado; lo que puede ayudar a los gestores de la gestión del agua a conocer donde su aplicación va a generar un beneficio mayor.

03 FORMULACIÓN DE LOS MODELOS DEA

Para entender cómo funcionan los modelos DEA se necesita introducir algunos conceptos básicos de la teoría económica de la producción. En este sentido, se define la productividad de una determinada DMU como la relación existente entre el producto que se obtiene y los recursos empleados en su producción (y/x), para el caso de una sola salida y una sola entrada. Es una forma de medir cómo se están aprovechando dichos recursos, en el caso de que en una DMU existan varias entradas y varias salidas la expresión matemática que se propone es la siguiente:

$$Productividad_j = \frac{\sum_{k=1}^{s} v_{kj} y_{kj}}{\sum_{i=1}^{m} u_{ij} x_{ij}} \qquad (1)$$

Donde:

j = 1, 2,…, n subíndice para las DMU

i = 1, 2,…, m subíndice para las entradas

k = 1, 2,…, s subíndice para las salidas

x_{ij}: cantidad de entrada o recurso i utilizado por una DMU j.

y_{kj}: cantidad de salida o resultado k que produce una DMU j.

u_{ij} y v_{kj}: son los pesos correspondientes a cada entrada y salida, que hace adimensional las expresiones de entrada y salida virtual.

m: número total de entradas consideradas.

s: número de salidas de la DMU.

Sin embargo, las técnicas DEA utilizan un nuevo concepto que se conoce como eficiencia relativa, para comparar una unidad con respecto a otra similar debido a que existen muchas variables importantes a ser tenidas en cuenta. Dicha eficiencia se determina de la siguiente manera:

$$Eficiencia_j = \frac{Productividad_j}{Productividad_{max}} \qquad (2)$$

Donde:

Subíndice j: indica la DMU que se va a estudiar.

Subíndice *máx*: DMU de máxima productividad.

UNA APLICACIÓN PRÁCTICA DE LA METODOLOGÍA DEA

Con un propósito exclusivamente didáctico y explicativo de la metodología DEA para evaluar la eficiencia en una organización. En la tabla 1 se recogen los datos ficticios de 8 empresas agropecuarias, cada una de ellas posee una variable de entrada (superficie regada) y una variable de salida (valor de la producción agrícola). Se desea conocer, cuál de esas empresas está haciendo mejor las cosas en el sentido de: consume pocos recursos y produce mucho. Este es uno de los objetivos de las técnicas DEA y del análisis de eficiencia, saber quién está haciendo mejor las cosas.

Tabla 1. Datos para ejemplificar las técnicas DEA.

Empresas	A	B	C	D	E	F	G	H
Superficie regada (ha)	2	3	4	3	5	5	6	8
Valor de la producción agrícola (millones de pesos)	10	20	30	30	40	20	30	50
Relación (valor de la producción agrícola/superficie regada)	5,0	6,67	7,5	10,0	8,0	4,0	5,0	6,25
Scores de eficiencia	0,50	0,67	0,75	1,00	0,80	0,40	0,50	0,63

Para saber cuál de las empresas lo está haciendo mejor, se aplicó el criterio del ratio (y/x o relación del valor de la producción agrícola/superficie regada), que permitirá conocer cuánto miles de peso se consigue por superficie regada. Analizando los valores de la tabla 1, se puede observar que la empresa que tiene mejores resultados es la D, ya que consigue 10 mil pesos por hectárea regada. Por lo tanto, se puede decir que dicha empresa es la más eficiente de todas en cuanto al uso de recursos y la obtención de resultados.

En la última fila, se muestra los valores de eficiencia mediante la normalización de la fila anterior. Esta normalización consiste, en dividir el ratio entre su máximo valor que para este ejemplo es 10, lo cual permitirá obtener valores entre 0 y 1. Siendo 1 lo mejor que se puede encontrar y 0 lo peor. Estos valores son conocidos también como scores de eficiencia. Estas puntuaciones de eficiencia al estar entre 0 y 1, permite interpretar cualquier resultado, en cualquier base de datos, en cualquier contexto, cerca del 1 significa lo mejor que puede pasar y cerca de 0 lo peor.

Si se analiza ahora gráficamente el ejemplo, en la figura 2 se representa los puntos de las 8 empresas estudiadas. Los ratios que se han calculado coinciden con la pendiente de la recta que pasa

por el origen y por el punto determinado que uno quiera; por ejemplo, la pendiente de la recta que pasa por 0 y por F tiene un valor de 4. Los valores de los ratios que se han calculado tienen una interpretación geométrica en términos de pendientes de rectas que pasan por el origen de coordenadas. Por lo que, analizando el gráfico solamente hay una empresa eficiente, la D, que es la que tiene mayor pendiente (10) y su recta envuelve los datos por arriba como si fuera un paraguas. Siendo esa la frontera de mejores prácticas hacia la cual tienen que tender las demás empresas para llegar a ser eficientes.

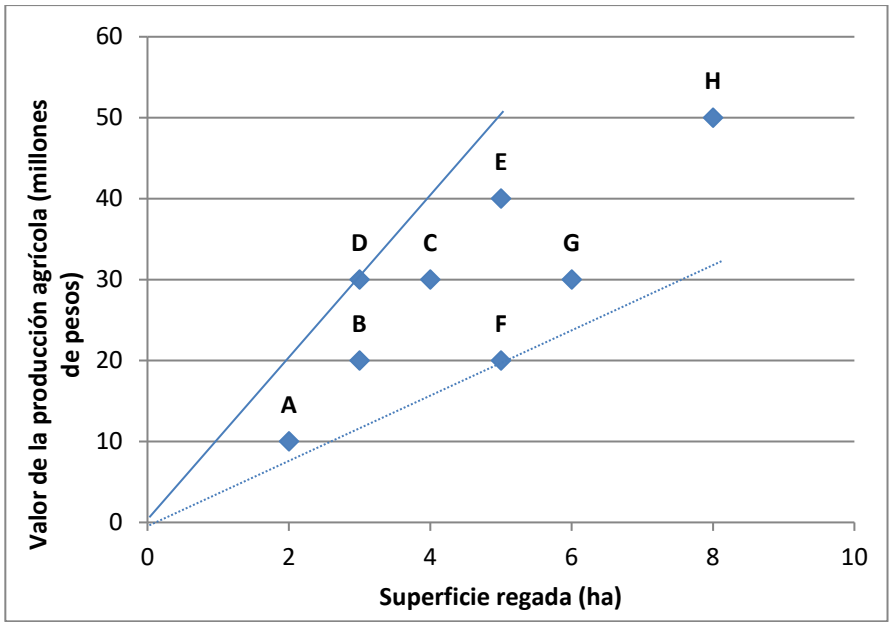

Figura 2. Representación gráfica de la superficie regada y la producción agrícola en diferentes empresas.

Partiendo de este concepto de Ratio en 1978, Charnes, Cooper y Rhodes generalizaron dicho concepto para medir eficiencia cuando tienen varios output e input introduciendo el concepto de peso. Peso de cada variable, peso de cada dimensión. Se pasa del concepto de dos dimensiones como vimos en el ejemplo a una función donde se evalúa la sumatoria de todos los output entre la sumatoria de todos los input.

Este concepto ya se conocía en la literatura, pero lo que se conocía es, que los pesos eran fijados por unos expertos. Pero esto no era lo que querían hacer los autores. Dichos investigadores jugaron con este concepto de eficiencia asociado al ratio pero en el cual los pesos quedaran libres y que fueran los propios datos que nos indicaran cuánto valen los pesos.

MODELO BÁSICO DE CHARNES, COOPER Y RHODES (CCR).

El modelo consiste en la resolución de n problemas de maximización, correspondientes a cada una de las unidades cuya eficiencia se quiere evaluar. La función objetivo elige los pesos que hacen máxima la eficiencia hJ de la DMU que se estudia. La expresión matemática que maximiza la eficiencia, con la libertad de elegir los pesos se expresa de la siguiente forma:

$$MAX\left[h_J = \frac{\sum_{k=1}^{s} v_{kj} y_{kj}}{\sum_{i=1}^{s} u_{ij} x_{ij}}\right] \qquad (3)$$

Sujeto a:

$$\frac{\sum_{k=1}^{s} v_{kj} y_{kj}}{\sum_{i=1}^{m} u_{ij} x_{ij}} \leq 1 \qquad j = 1,2,\ldots.,n$$
$$v_{kj} \geq \varepsilon > 0 \qquad \mathrm{k} = 1,2,\ldots.,\mathrm{s}$$
$$u_{ij} \geq \varepsilon > 0 \qquad i = 1,2,\ldots.,m$$

Donde: h_J: eficiencia de la DMU que se estudia; ε : es un número real estrictamente positivo. Este valor representa una constante no-arquimediana (menor que cualquier número real positivo), y por tanto, en las restricciones donde aparece, se les obliga a los pesos a que nunca puedan ser nulos.

Este modelo de optimización lo que recoge es que, para cada DMU, para cada empresa; determinar unos pesos que maximicen el rendimiento de dicha empresa. Que la coloquen en la mejor posición posible. Al final lo que se obtiene es unos pesos, un valor óptimo de esa función objetivo. Es decir, un score de eficiencia entre 0 y 1.

Este modelo DEA creado por los autores se conoce como CCR y, puede construirse con dos objetivos diferentes: maximizar las salidas, manteniendo la cantidad de entradas (modelo orientado a salidas) o minimizar las entradas, manteniendo los niveles de salidas (modelo orientado a entradas). Esta metodología busca establecer qué empresas de una muestra determinan la superficie envolvente o frontera de producción eficiente. La distancia radial de una empresa hacia la frontera provee la medida de su eficiencia. Para resolver el modelo lineal fraccional (ecuación 3), los autores llevaron a cabo un proceso de transformación de variables y obtuvieron un modelo lineal equivalente. La forma envolvente de ese modelo CCR, orientado a entradas, para DMUj, se muestra a continuación:

$$MIN: \theta_J - \varepsilon[\sum_{k=1}^{s} h_k^+ + \sum_{i=1}^{m} h_i^-] \qquad (4)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij}\lambda_j = \theta_J x_{i0} - h_i^- \qquad i = 1,2,\ldots.,m$$

$$\sum_{\boldsymbol{j=1}}^{\boldsymbol{n}} \boldsymbol{y_{rj}\lambda_j} = \boldsymbol{y_{r0}} + \boldsymbol{h_k^+} \qquad k = 1,2,\ldots.,s$$

$$\lambda_j, h_i^-, h_k^+ \geq 0$$

$$\theta_J \quad libre$$

Donde:

λ_j y ϑ_J son variables del modelo; h_i^- y h_k^+, variables de holgura de input y output, respectivamente y x_{ij} y y_{kj} son las entradas y salidas de la DMU_j, respectivamente. En este caso, se evalúa la eficiencia de la DMU o ($DMU_j = DMU_o$).

Resolviendo este modelo de programació n *J* veces, una para cada DMU, se obtiene un vector de estimaciones de eficiencia técnica. Una unidad es 100% eficiente si y solo si θ* = 1 y $h_i^{*-} = 0$ y $h_k^{*+} = 0$, para todo *i* y *r*. Una puntuación igual a 1, junto con valores nulos para las holguras, indica que la unidad en cuestión obtiene una producción dada a partir del consumo mínimo de los recursos disponibles para ella y las condiciones bajo las que opera.

Una puntuación que es menor que 1 (θ*< 1) indica que la unidad productiva evaluada es técnicamente ineficiente, por cuanto puede reducir las cantidades empleadas de todos sus inputs en una proporción igual a (1 - θ*).

El modelo CCR asume que todas las DMU operan a escala óptima, asumiendo rendimientos constantes a escala (CRS, pssi). No obstante, rara vez el mercado funciona de forma ideal, siempre existe limitaciones financieras, mercados de competencia imperfecta, etc. que hacen que el aumentar la cantidad de inputs no produzca el mismo aumento en la cantidad de outputs obtenida. La agricultura es un claro ejemplo de lo anteriormente expuesto, no por aumentar la cantidad de agua suministrada a los cultivos vamos a obtener un aumento linealmente proporcional en el volumen de cosecha obtenida.

Para intentar contabilizar este efecto en la obtención de la eficiencia, en 1984 se presentó el modelo DEA para retornos variables a escala, desarrollado por Banker, Charnes y Cooper (BCC), este modelo permitirá calcular la eficiencia técnica pura (ETP), esto es, la eficiencia separándola de los efectos de escala (Banker et al. 1984).

MODELO DE BANKER, CHARNES Y COOPER (BCC).

El modelo BCC va a presentar una frontera curva, va a tomar más puntos como eficientes y por tanto, va a ser más útil para determinar eficiencias locales, en ámbitos de aplicación en los que imperan una serie de restricciones que impiden ciertos valores de producción, pero que aún así, hace que una DMU, dentro de ese marco, esté trabajando de manera eficiente (Rodríguez 2003).

Para que el modelo considere los retornos de escala variables habrá que introducir, a partir del modelo RATIO linealizado, alguna restricción o alguna variable que le indique al modelo que cada DMUJ tiene que ser comparada con aquéllas de su tamaño y no con todas las unidades presentes en el problema. Modificando la forma envolvente del modelo CCR orientado a entradas se obtiene la formulación del modelo BCC orientado a entrada:

$$MIN: \theta_J - \varepsilon[\sum_{k=1}^{s} h_k^+ + \sum_{i=1}^{m} h_i^-] \qquad (5)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij}\lambda_j = \theta_J x_{iJ} - h_i^- \qquad i = 1, 2, \ldots\ldots, m$$

$$\sum_{j=1}^{n} y_{kj}\lambda_j = y_{kJ} + h_k^+ \qquad k = 1, 2, \ldots\ldots, s$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j = 1$$

$$\lambda_j, h_i^-, h_k^+ \geq 0$$

$$\theta_J \quad libre$$

Se puede observar que la restricción adicional que aparece en el dual de este modelo [suma de las componentes del vector ($\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_n$) igual a uno] obliga a que la proyección de la unidad se efectúe sobre el hiperplano que forman las unidades más productivas de su tamaño. En general, para este caso, aparecerán unidades que no eran eficientes en el anterior modelo (retornos de escala

constantes) y que sin embargo en este modelo sí lo son. De ahí que la frontera eficiente esté formada, en general, por más unidades que en el modelo CCR.

La diferencia que existe entre el modelo CCR y el BCC se debe a que, la frontera del CCR emplea un único punto, por lo que sólo una DMU es eficiente, mientras que el modelo BCC ofrece más soluciones eficientes, que van a definir la curva de producción óptima, adaptándose mejor a las condiciones reales del mercado, por tanto, se puede afirmar que el modelo de retornos variables va a envolver más datos y de aquí se deduce que la eficiencia técnica pura siempre va a ser menor o igual que la eficiencia técnica global (figura 3).

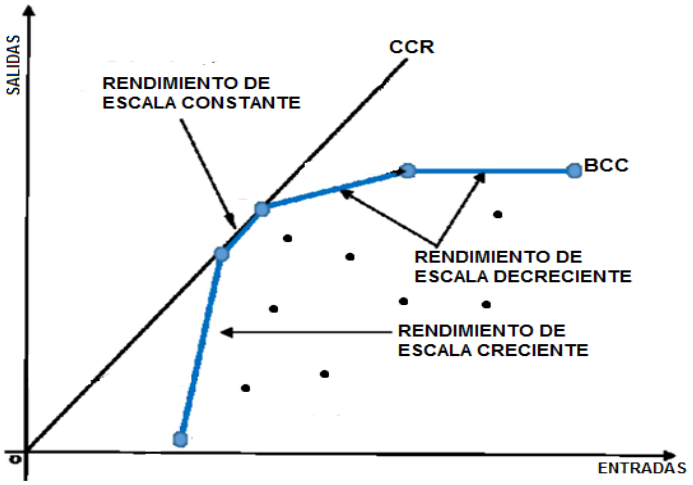

Figura 3. Diferencia entre el modelo CRR y BCC. Tomada de Altamirano et al. (2019).

DATOS ENTRADAS/SALIDAS Y RENDIMIENTOS DE ESCALA

Al aplicar DEA para la evaluación comparativa del rendimiento del riego, se debe tener cierto grado de precaución en el número y la selección de variables que se analizarán y procesarán. La selección de variables debe estar estrechamente relacionada con los objetivos del estudio y el proceso productivo que se evalúa. Además, existe el riesgo de que la adopción de demasiados indicadores de desempeño permitiría a la técnica DEA considerar eficientes todas o la mayoría de las asociaciones de usuarios analizadas y, por lo tanto, no proporcionaría ninguna información sobre las desviaciones de la situación actual con respecto a la gestión óptima (Alcón et al. 2017).

Evaluar en la agricultura todas las entradas (inputs) y las diversas salidas (outputs) que se utilizan y que se van a obtener durante la campaña agrícola sería algo imposible. Al evaluar el uso eficiente del agua de riego mediantes técnicas DEA, el agua, no puede ser considera como algo aislado, sino como un integrante de un proceso de producción en el que van a intervenir varios elementos.

Autores como Rodríguez (2003) y Olmedo (2017), en un estudio de eficiencia mediante técnicas DEA en las áreas de riego de Andalucía (España) y Sonora (México) emplearon como variables de entradas tres factores que están presentes en el proceso de producción agrícola que son: 1) superficie regada (ha), 2) volumen de agua total para la superficie regada (millones m^3) y 3) la mano de obra empleada (UTA, unidad de trabajo anual) ó los costos de producción (millones de pesos); y como variable de salida (output) el valor total de la producción agrícola (millones de pesos) (figura 3). Esto permitió caracterizar la producción de una forma muy aproximada, permitiendo distinguir entre los diversos tipos de agricultura, al considerar las entradas que más van a diferir entre unos sistemas y otros.

Por otro lado, la metodología DEA presenta dos tipos de tecnologías: (1) Retornos de Escala Constante (CRS, pssi) y (2) Retornos de Escala Variables (VRS, pssi). La tecnología CRS considera como unidad más eficiente la que proporcione más salidas, consumiendo menos recursos (eficiencia global), mientras que en la tecnología VRS, existirá una frontera de eficiencia representada por las unidades que son eficientes técnicamente y todos los puntos que forman una combinación lineal convexa. Las unidades con eficiencia técnica son eficientes en comparación con las de su tamaño. Según Rodríguez et al. (2008), la escala de la actividad (es decir, el tamaño de la organización) tiene un efecto importante en su eficiencia.

Los rendimientos de escala constante, significa que, si los recursos utilizados aumentan en determinada proporción, el rendimiento obtenido aumenta exactamente en la misma proporción. En el caso de los rendimientos de escala variables, significan que se tienen rendimientos (outputs) crecientes y/o decrecientes; donde en el primer caso el rendimiento se incrementa en mayor proporción que los recursos (inputs) utilizados y en el segundo caso, el incremento en rendimiento es menor, que el incremento porcentual de los recursos (Olmedo 2017).

Cuando una unidad domina a otra es porque tiene menos entradas y/o más salidas la tecnología considerada. Si por el contrario la DMU no es eficiente, el modelo la proyecta sobre la frontera eficiente y mide la eficiencia de la DMU en términos de reducción del consumo de las entradas e incremento en la producción de salida. Hay diferentes maneras de realizar la proyección y medición de la distancia entre la DMU y el punto sobre el que se proyecta. La proyección puede hacerse de la entrada (orientación a la entrada) o de la salida (orientación a la salida). Así, la orientación de entrada consiste en la reducción tanto como sea posible de todos los recursos de forma equi-proporcional sin reducir las salidas. Por otra parte, la orientación de salida consiste en incrementar tanto como sea posible los productos de forma equi-proporcional sin un incremento de las entradas (Cooper et al. 2004). El modelo orientado a entrada (I-O) mide la capacidad de una DMU para mantener la misma capacidad de producción utilizando un mínimo de insumos. El modelo orientado a salida (O-O) se refiere a la capacidad de una DMU para lograr el volumen máximo de producción con los insumos disponibles.

05 CONCLUSIONES

Las técnicas de Análisis de Envolventes de Datos son válidas para evaluar la gestión de procesos en el sistema de la agricultura, en particular la relación recursos-resultados en las actividades relacionadas con el riego agrícola.

La aplicación de estas técnicas permite diferenciar las áreas que obtienen una mejor relación recursos-resultados de aquellas que obtienen niveles por debajo de sus posibilidades y constituyen una herramienta útil para identificar las prácticas de riego más adecuadas en escenarios agrícolas.

La utilización adecuada de estas herramientas aporta información útil para el diseño de políticas gubernamentales que promuevan mayores niveles de eficiencia en la agricultura cubana.

Las técnicas DEA contribuyen a disminuir el consumo de agua, especialmente crítico en el regadío cubano, detectar ineficiencias locales, comparar áreas de riego de muy diversa índole, además de detectar qué zonas presentan un mayor potencial de crecimiento.

06 REFERENCIAS

Alcón F., García P., Soto M., Martínez V., Martín B. and Baill A. (2017). Explaining the performance of irrigation communities in a water scarcity area. Irrigation Sci, 35, 193-203. ISSN: 1432-1319 DOI:10.1007/s00271-016-0531-7

Altamirano A., Valdez J. B., León J. I., Betancourt M., y Osuna T. (2019). Evaluación del desempeño de los distritos de riego en México mediante análisis de eficiencia técnica. Tecnología y ciencias del agua, 10(1), 85-121. ISSN electrónico: 2007-2422. México. DOI: 10.24850/j-tyca-2019-01-04.

Aparicio J. (2007). Una introducción al análisis envolvente de datos. BEIO, Boletín de Estadística e Investigación Operativa. ISSN 1889-3805, Vol. 23, Nº. 1. España. https://www.researchgate.net/publication/28299160.

Banker R., Charners A. and Cooper W. (1984). Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. Management Science. Vol. 30 pp. 1078-1092. DOI:10.1287/MNSC.30.9.1078

Charnes A., Cooper W., and Rhodes E. (1978). Measuring the Efficiency of Decision Making Units. European Journal of Operational Research, vol. 2, nº 6, pp. 429-444. ISSN: 0377-2217.

Cisneros, E., López, T., Leyva, A. y Placeres, Z. (2011). Consideraciones sobre el servicio de asesoramiento al regante para las condiciones de Cuba. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, Vol. 20, No. 3. La Habana, Cuba. ISSN: 1010-2760.

Cooper W., Seiford L. and Zhu, J. (2004). Handbook On Data Envelopment Analysis. Kluwer Academic Publisher, ISBN: 1402077971.

González P., Cisneros E., Placeres Z. y Quintana E. (2004). La eficiencia institucional: factor de gran peso en la eficiencia global de los sistemas de riego y drenaje. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, Vol. 13, No. 4. La Habana, Cuba. ISSN: 1010-2760

Olmedo V. (2017). Determinación de indicadores de gestión en los Módulos del Distrito de Riego No. 041, Río Yaqui (Sonora, México). Tesis en opción al título de doctor en ciencias. Departamento de Agronomía, Universidad de Córdoba, España.

Rodríguez J. (2003). Estudio de la gestión del agua de riego y aplicación de las técnicas Benchmarking a la zonas regables de Andalucía. Tesis en opción al título de doctor en ciencias. Departamento de Agronomía, Universidad de Córdoba, España.

Rodríguez J., Camacho E., López R. and Pérez L. (2008). Bechmarking and multivariate data analysis techniques for improving the efficiency of irrigation districts: An application in Spain. Agricultural Systems. Volumen 96, 250-259. ISSN: 0308-521X.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Rafael Miguel Pacheco Moya https://orcid.org/0000-0001-7053-3791
Realizó contribuciones al diseño de la investigación, realizó la redacción del informe final.

Pavel Vargas Rodríguez https://orcid.org/0000-0003-3316-0898
Realizó contribuciones al diseño de la investigación, a la revisión y redacción del informe final.

Acciones para la optimización del sistema de agua potable en Manglaralto, Ecuador.

Adrian Steven Pacheco Peñafiel
Profesional independiente
E-MAIL: adrispp10@gmail.com

RESUMEN

Este trabajo fue realizado en las comunas Manglaralto, Montañita, Libertador Bolívar, Cadeate, San Antonio y Río Chico, parroquia Manglaralto, provincia de Santa Elena. El objetivo fue evaluar el estado actual del sistema de distribución de agua potable para la propuesta de acciones de mejora que permitan un funcionamiento adecuado hasta el año 2037. El proceso comprendió la revisión bibliográfíca, catastro, balance de masas (de acuerdo con la Normativa Ecuatoriana) y la toma de acciones de mejora. Los resultados mostraron que el sistema posee problemas de presión, configuración inadecuada, el volumen de los reservorios es inapropiado y el caudal bombeado en los pozos será insuficiente a partir del año 2026. Se concluye que para garantizar un servicio óptimo y confiable, es preciso asegurar la fuente de agua y la infraestructura hídrica.

PALABRAS CLAVES: agua potable, manglaralto, problemas de abastecimiento, sistema de distribución.

Actions for the optimization of the drinking water system in Manglaralto, Ecuador.

ABSTRACT

This work was carried out in the Manglaralto, Montañita, Libertador Bolívar, Cadeate, San Antonio and Río Chico communes, Manglaralto parish, Santa Elena province. The objective was to evaluate the current state of the drinking water distribution system for the proposed improvement actions that allow proper operation until the year 2037. The process included the review of the bibliography, cadaster, mass balance (according to Ecuadorian Regulations) and taking improvement actions. The results showed that the system has pressure problems, inadequate configuration, the volume of the reservoirs is inadequate and the flow pumped in the wells will be insufficient from the year 2037. It is concluded that to guarantee an optimal and reliable service, it is necessary to ensure the water source and water infrastructure.

KEYWORDS: drinking water, manglaralto ,supply problems, distribution system.

CITMA CERTIFICADO

Marzo 2024-RECIBIDO *APROBADO-Abril 2024*

Esta obra está bajo una licencia internacional creative commons attribution-noncommercial 4.0

SciELO

01 INTRODUCCIÓN

El acceso a agua suficiente, saludable, y asequible para el desarrollo de las actividades domésticas y personales es un derecho e indispensable para el cumplimiento de otros. La falta de acceso a servicios de agua y saneamiento está relacionada con malas condiciones de vida y salud, así como también a falta de oportunidades de empleo y educación (WWAP 2019). De acuerdo con el INEC (2019), en Ecuador la población sin acceso a agua potable es del 26,6%, siendo el área rural la más afectada y la región Costa la segunda con menor acceso al líquido vital (INEC, 2019).

En la parroquia rural de Manglaralto, la Junta Administradora de Agua Potable Regional de Manglaralto (JAAPMAN), se encarga de administrar la distribución de agua potable a las comunas Manglaralto, Montañita, Libertador Bolívar, Cadeate, San Antonio y Río Chico. La JAAPMAN brinda servicio a una población local y una considerable población flotante de 20 000 personas (Acosta Maldonado et al. 2019), puesto que, la zona costera es uno de los destinos turísticos preferidos en el país.

El desabastecimiento de agua es un problema recurrente (última ocasión en 2021) que se agrava en los meses de invierno, cuando se reciben más turistas, las instituciones gubernamentales suelen enviar vehículos abastecedores de agua para aliviar el problema (El Universo, 2021). Los principales problemas ambientales que afectan el abastecimiento de agua a la población son la deforestación del bosque, escasez hídrica y aumento de área poblada no planificada (Equipo Técnico Consul and Project S.A. 2019).

El sistema de agua potable ha sido diseñado de manera empírica, lo que ha ocasionado que no se cuente con planos actualizados, ni una base de datos del sistema y que el diseño tenga una configuración inadecuada (Pacheco y Guadamud 2022). El sistema consta de la red de aducción e impulsión, reservorios y pozos que captan las reservas del acuífero costero.

El acuífero puede retener hasta 13,6 Hm3 de líquido, no obstante, estas reservas se han visto afectadas por la sobreexplotación (Carrión-Mero et al. 2021). De 2008 a 2016 el volumen extraído ha aumentado en aproximadamente 43%, en el mismo tiempo el volumen del acuífero disminuyó cerca de 3,5 Hm3 (Carrión et al. 2018).

El objetivo de la presente investigación, fue evaluar el estado actual del sistema de distribución de agua potable para la propuesta de acciones de mejora que permitan un funcionamiento adecuado hasta el año 2037.

02 DESARROLLO

Este trabajo fue realizado entre los años 2021 y 2022. Las seis comunas servidas (figura 1) por la JAAPMAN se localizan en la parroquia rural Manglaralto, al norte de la provincia de Santa Elena, Ecuador.

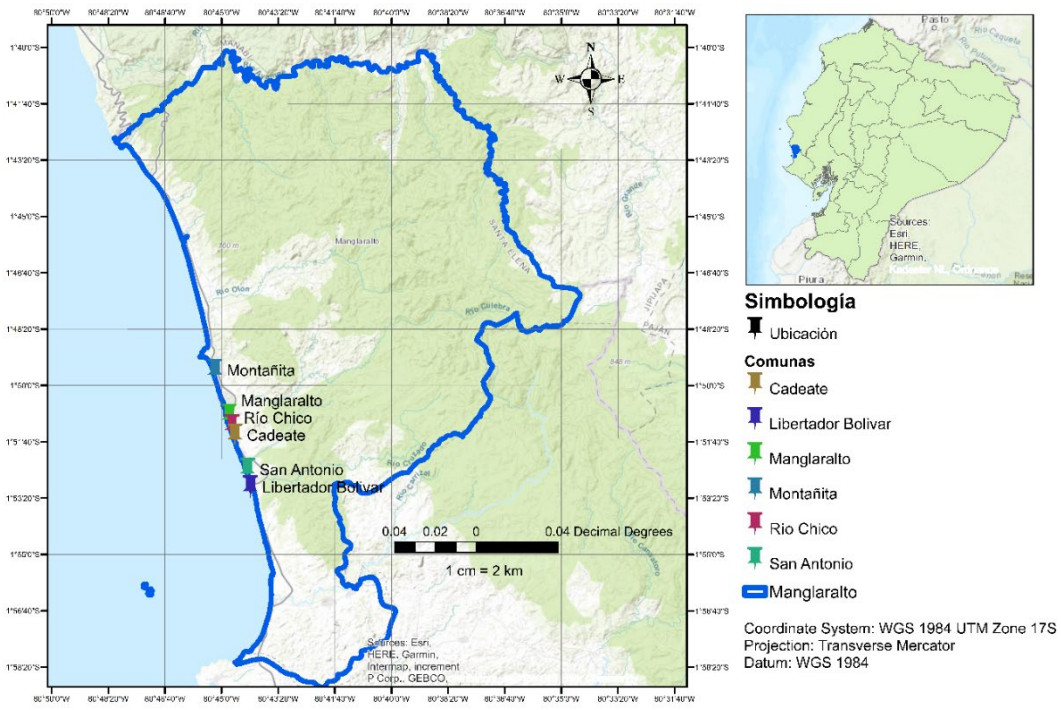

Figura 1. Ubicación de las comunas abastecidas por JAAPMAN (Pacheco y Guadamud, 2022)

El primer paso consistió en la recopilación y revisión de toda la información pertinente al estudio, seguido por la socialización con los miembros de la JAAPMAN, donde se averiguaron los problemas detectados en el sistema y se solicitó la ayuda de los técnicos de la institución.

Se efectuó el catastro de la red existente por medio del GPS diferencial (RTK) con sistema de georreferenciación UTM-WGS 84 zona 17S, equipo que recolecta las coordenadas espaciales de los elementos del sistema (válvulas, pozos, reservorios, etc.), también se llevó un registro gráfico de los datos que sirvió para unir las redes en la siguiente fase.

Se realizó el balance de masas trazando el funcionamiento del servicio hasta el año 2037. Para los cálculos se utilizaron las recomendaciones y guías que se plantean en la normativa ecuatoriana CPE INEN 5 Parte 9-1:1992 y CPE INEN 5 Parte 9.2:1997. Se calculó la proyección población por los métodos geométrico, aritmético y exponencial, a su vez, se estimó la población flotante asignando un crecimiento anual recomendado del 1%.

Ya con la proyección poblacional, se calculó el caudal necesario para el abastecimiento mediante la contabilización y categorización de las edificaciones de acuerdo con el uso, se asignaron las dotaciones, se estipuló que el 75% de la población flotante se hospeda en la zona y el área de las edificaciones. Se determinó la dotación que cada población ocupa (D) con crecimiento de 1% anual, posterior el caudal para cada una (Q) y por último el caudal medio diario (Qmd), caudal máximo diario (Qmaxd), caudal máximo horario (Qmaxh) y caudal de diseño (Qd) con las ecuaciones (1)-(2)-(3)-(4)-(5) y (6) respectivamente.

$$D = \frac{Q}{P} \quad (1)$$

$$Q = \frac{D*P}{86.400} \quad (2)$$

$$Q_{md} = Q_{endémica} + Q_{flotante} \quad (3)$$

$$Q_{maxd} = Kd * Qmd \quad (4)$$

$$Q_{maxh} = Kh * Qmd \quad (5)$$
$$Q_d = Qmaxh + Qi \quad (6)$$

Donde:

P= población;

Kd= coeficiente de variación del consumo máximo diario (1,3);

Kh= coeficiente de variación del consumo máximo horario (2) y

Qi= caudal por incendios (40 L/s).

El *Qmaxd*, permitió cuantificar el volumen necesario en reserva, el cual es la suma de los volúmenes de regulación (*VolReg*), de emergencia (*VolRes*) y de incendio (*VolInc*), los cuales se calcularon con las ecuaciones (7)-(8) y (9) respectivamente. Se establece un régimen de consumo de 24 h con un porcentaje de consumo de acuerdo con el momento y se calculó el volumen de regulación.

$$VolReg = diferencia\ acumulada\ maxima - |diferencia\ acumulada\ minima| \quad (7)$$
$$VolRes = 0{,}25 * VolReg \quad (8)$$
$$VolInc = 100\sqrt{\frac{P}{1\,000}} \quad (9)$$

La información del catastro se obtuvo en forma de un archivo **.csv*, el cual se exportó a un sistema de información geográfica que facilita la visualización de las coordenadas obtenidas en el paso previo. A continuación, se trazaron las tuberías de acuerdo con la información anotada. Por último, se realizó una comparación entre la situación actual con los requisitos necesarios actualmente y al final del periodo de diseño, con el fin de brindar acciones de mejora.

03 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La socialización fue un paso crucial en el estudio, debido a que, solo los técnicos de JAAPMAN poseen el conocimiento sobre el sistema. Existen 16 pozos distribuidos a lo largo de la red de captación que bombean 139,5 L/s de agua a los reservorios, el volumen de reserva total es de 1 440 m^3.

En la proyección poblacional (figura 2), a pesar de que el método exponencial brindó resultados muy similares al método geométrico, sobre la base del coeficiente de determinación, el método geométrico ofreció mejores resultados. Lógicamente, la población local es mayor a la flotante; sin embargo, los turistas representan una gran parte de los habitantes a servir y esto no cambia al final del periodo de diseño donde es el 38,2% del total. En comunidades que son un gran atractivo turístico, es imprescindible controlar el flujo de turistas. Una buena estimación de la población flotante influirá en gran medida a calcular un caudal que se ajuste más con las necesidades de la zona.

En la tabla 1 se aprecia como el uso y consumo de agua en la población flotante supera al de la población endémica, por lo tanto, es determinante realizar una buena estimación a la hora de calcular la dotación. La dotación crece aproximadamente un 1,15% anualmente, estando cerca del valor estipulado en INEN (1997), pero inclinándose al valor dado en sitios urbanos, lo cual concuerda con lo observado en las visitas de campo (la zona se va urbanizando).

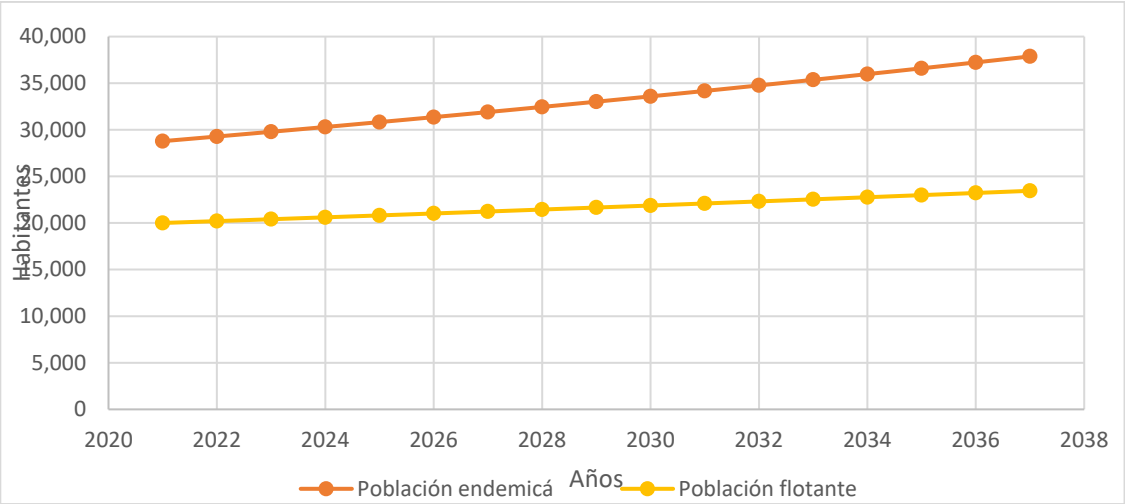

Figura 2. Población proyectada hasta el año 2037

Tabla 1. Crecimiento del consumo de agua según la población

Año	P. Total	D. Endémica (L/hab.día)	D. Flotante (L/hab.día)	Q. Endémica (L/s)	Q. Flotante (L/s)	D. (L/hab.día)
2021	48 779	55,00	114,50	18,32	26,50	79,40
2022	49 477	55,55	115,65	18,82	27,04	80,09
2023	50 186	56,11	116,80	19,34	27,58	80,78
2024	50 906	56,67	117,97	19,87	28,14	81,48
2025	51 637	57,23	119,15	20,42	28,70	82,19
2026	52 378	57,81	120,34	20,98	29,28	82,90
2027	53 131	58,38	121,54	21,56	29,87	83,62
2028	53 896	58,97	122,76	22,15	30,47	84,35
2029	54 672	59,56	123,99	22,76	31,08	85,08
2030	55 461	60,15	125,23	23,38	31,70	85,82
2031	56 260	60,75	126,48	24,03	32,34	86,56
2032	57 073	61,36	127,74	24,69	32,99	87,31
2033	57 898	61,98	129,02	25,36	33,65	88,07
2034	58 735	62,60	130,31	26,06	34,33	88,84
2035	59 585	63,22	131,61	26,78	35,02	89,61
2036	60 449	63,85	132,93	27,51	35,72	90,39
2037	61 326	64,49	134,26	28,27	36,44	91,17

La diferencia en la magnitud de los caudales es apreciable en la figura 3, reflejándose la especial importancia del caudal por incendio en el diseño (alrededor del 24% para el 2037). Al comparar el caudal bombeado de los pozos con el caudal de diseño, se dedujo que este será insuficiente a partir del año 2026. Para suplir esta demanda lo ideal sería implementar nuevos pozos o realizar la repotenciación de los existentes, pero esto debe ir de la mano con proyectos de siembra y cosecha de agua que permitan una recarga artificial adecuada del acuífero. En el año 2037 la población utilizará 5,3 Hm^3 de líquido vital, este volumen es mucho mayor (inclusive si se realizara una proyección) a lo expuesto en Carrión et al. (2018), no obstante, se debe recordar que es un valor ideal, en la realidad el volumen extraído se ve afectado por factores como sequía, infraestructura, entre otros. De acuerdo con la investigación de Carrión-Mero et al. (2021), el acuífero es capaz de brindar la cantidad de agua necesitada, empleando alrededor del 50% de su capacidad.

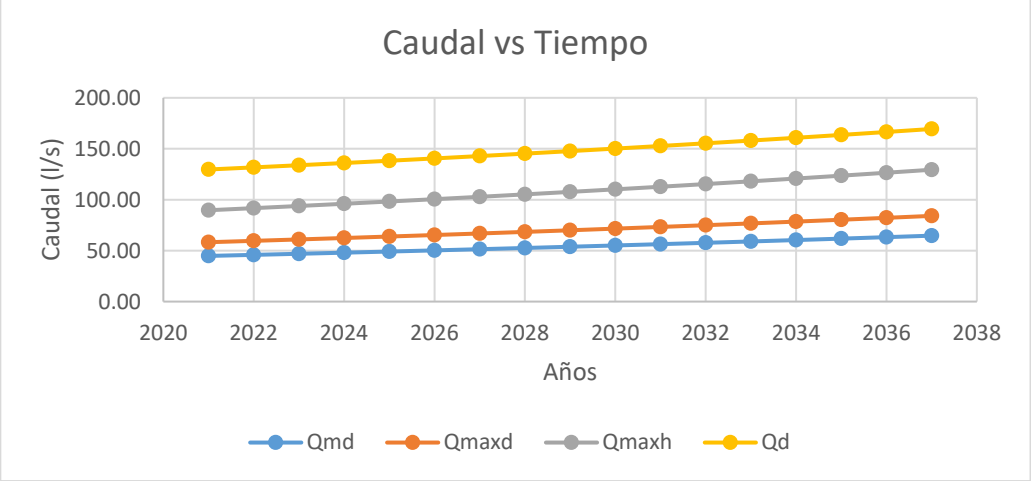

Figura 3. Caudales proyectados hasta el año 2037

El régimen de consumo (tabla 2) permitió establecer el volumen de reserva necesario, para el presente año se necesita un volumen de 1 465,9 m^3, mientras que en 2037 serán 1 924,8 m^3. Actualmente la cantidad en reserva es insatisfactoria y hacia el final del periodo de diseño será necesaria la cantidad de 485 m^3 (incremento del 33,68%); por tal razón, se necesita construir un reservorio, se aconsejó localizar la estructura en la comuna Libertador Bolívar, lo que a su vez resolverá problemas de falta de presión. Adicionalmente, se debe establecer un horario de funcionamiento de las bombas, puesto que actualmente el técnico se guía con su criterio para operar las mismas.

Tabla 2. Régimen de consumo estimado en 2022

Horas	Entrada (m^3)	% de consumo	Salida (m^3)	Diferencia (m^3)	Diferencia acumulada (m^3)
0a1	214,63	45%	96,58	118,05	118,05
1 a2	214,63	45%	96,58	118,05	236,10
2a3	214,63	45%	96,58	118,05	354,14
3a4	214,63	45%	96,58	118,05	472,19
4a5	214,63	45%	96,58	118,05	590,24
5a6	214,63	60%	128,78	85,85	676,09
6a7	214,63	90%	193,17	21,46	697,55
7a8	214,63	135%	289,75	-75,12	622,43
8a9	214,63	150%	321,95	-107,32	515,12
9a10	214,63	150%	321,95	-107,32	407,80
10a11	214,63	150%	321,95	-107,32	300,48
11a12	214,63	140%	300,48	-85,85	214,63
12a13	214,63	120%	257,56	-42,93	171,71
13a14	214,63	140%	300,48	-85,85	85,85
14a15	214,63	140%	300,48	-85,85	0,00
15a16	214,63	130%	279,02	-64,39	-64,39
16a17	214,63	130%	279,02	-64,39	-128,78
17a18	214,63	120%	257,56	-42,93	-171,71
18a19	214,63	100%	214,63	0,00	-171,71
19a20	214,63	100%	214,63	0,00	-171,71
20a21	214,63	90%	193,17	21,46	-150,24
21a22	214,63	90%	193,17	21,46	-128,78
22a23	214,63	80%	171,71	42,93	-85,85
23a24	214,63	60%	128,78	85,85	0,00
Total	5151,17	24	5151,17	0,00	4389,22

Del catastro y digitación de datos, se obtiene el plano esquemático del sistema (figura 4). En este se encuentra un grave problema de configuración, parte de la población de Manglaralto se abastece por medio de la línea de impulsión. Como solución, lo que se aconsejó fue implementar un reservorio que pueda captar y conducir el agua de manera más eficiente. Por último, se sugirió el cierre de las redes, ya que, el sistema es una combinación de red cerrada y abierta, ocasionando acumulación de sedimento en los tapones. Esto debe ser estudiado a través de modelación hidráulica, lo que permitirá conocer el comportamiento de las presiones, velocidades del flujo y un mapa de presiones para analizar la factibilidad del servicio a nuevos usuarios.

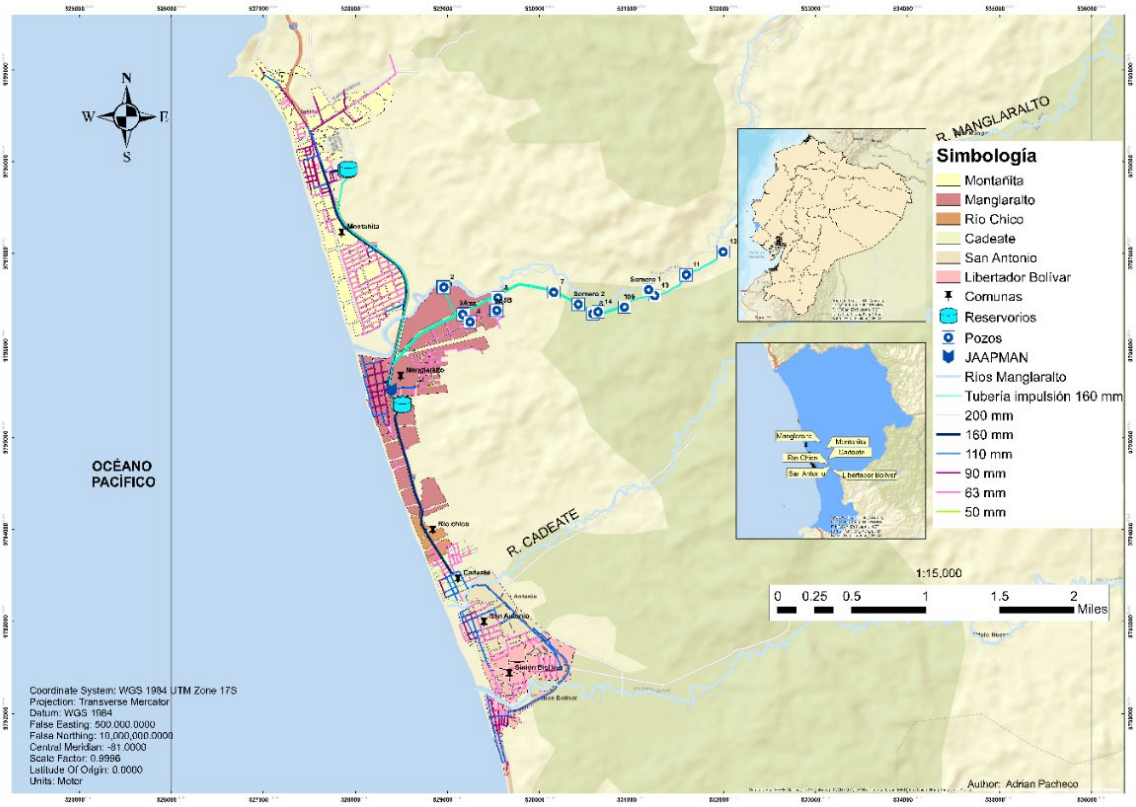

Figura 4. Plano esquemático del sistema de agua potable

El problema de la desactualización era más grave de lo pensado, si bien ahora los técnicos de la JAAPMAN tienen conocimiento de memoria de la configuración del sistema, en caso de que alguno de ellos llegara a faltar, se necesitaría capacitar a nuevo personal y para ello es preciso los planos del sistema. Además, con la base de datos se puede realizar la continua actualización de las reparaciones y adiciones de nuevos tramos que se lleven a cabo. En cuanto al diseño, se debe estudiar cada elemento del sistema para repotenciar las instalaciones y suplir las necesidades, de esta forma también se potenciará la vida útil de las mismas.

04 CONCLUSIONES

Una acertada proyección población y estudio de las costumbres de uso y consumo de agua potable, son factores fundamentales para establecer las condiciones necesarias de abastecimiento y no sobredimensionar o infradimensionar las estructuras.

Hasta el año 2022 la reserva de líquido era teóricamente suficiente para abastecer a la población. Es apremiante la necesidad de nueva estructura para reserva de agua, de tal manera que resuelva los problemas de configuración y presión, sin embargo, esto debe ser analizado por medio

de modelación hidráulica. Cada aspecto del sistema debe ser examinado por separado y en conjunto, para garantizar su funcionamiento óptimo y lograr alcanzar la mayor vida útil.

Actualmente existe la disponibilidad suficiente de líquido vital para el abastecimiento, sin embargo, esta situación cambiará en pocos años. Para garantizar un servicio óptimo y confiable, es preciso asegurar la fuente de agua y la infraestructura hídrica, esto puede llevarse a cabo con programas de protección de las áreas de recarga hídrica conjunto con proyectos de siembra y cosecha de agua y planificación urbana.

Aunque ahora se cuenta con una base de datos donde ir actualizando las modificaciones y nuevos tramos que se produzcan en el sistema, este hecho por sí solo no hace una diferencia significativa, puesto que la institución necesita personal calificado para hacer las actualizaciones pertinentes. Las industrias de agua deben contratar personal capacitado en el tema o solicitar el apoyo a las instituciones educativas, de este modo los estudiantes brindarán sus servicios mientras adquieren conocimiento practico.

RECONOCIMIENTO

Se realiza un especial reconocimiento a los miembros de JAAPMAN y CIPAT por el acompañamiento realizado a lo largo de todo el proyecto.

05 REFERENCIAS

Acosta Maldonado M. E., Basani M. y Solís H. (2019). Prácticas y saberes en la gestión comunitaria del agua para consumo humano y saneamiento en las zonas rurales de Ecuador (pp. 48–49). Inter-American Development Bank. https://doi.org/10.18235/0002022

Carrión P., Herrera G., Briones J., Sánchez C. and Limón J. (2018). Practical adaptations of ancestral knowledge for groundwater artificial recharge management of Manglaralto coastal aquifer, Ecuador. 217, 375–386. https://doi.org/10.2495/sdp180341, Siena, Italia.

Carrión-Mero P., Quiñonez-Barzola X., Morante-Carballo F., Montalván F. J., Herrera-Franco G. and Plaza-Úbeda J. (2021). Geometric Model of a Coastal Aquifer to Promote the Sustainable Use of Water. Manglaralto, Ecuador. Water, 13(7), 923. https://doi.org/10.3390/w13070923, Ecuador.

Equipo Técnico Consul and Project S.A. (2019). Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial 2019–2023 (pp.59–61). http://gadmanglaralto.gob.ec/pdot/1/#:~:text=PDOT%20PDOT%202019%2D2023,-El%20GAD%20Manglaralto&text=41).,las%20%C3%A1reas%20urbanas%20y%20rurales., Ecuador.

INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos) (2019). Medición de los indicadores de Agua, Saneamiento e Higiene (ASH), en Ecuador. (p.18). https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/EMPLEO/2019/Indicadores%20ODS%20Agua%2C%20Saneamiento%20e%20Higiene-2019/3.%20Principales%20resultados%20indicadores%20ASH%202019.pdf, Ecuador.

INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización) (1997). Código ecuatoriano de la construcción. (C.E.C) diseño de instalaciones sanitarias: Código de práctica para el diseño de sistemas de abastecimiento de agua potable, disposición de excretas y residuos líquidos en el área rural.

10.07-610 CPE INEN 5ta parte 9.2:1997 17. https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/cpe_inen_5%20parte_9-2.pdf. Ecuador.

INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización) (1992). Normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes, 01.09-603 CPE INEN 5ta parte 9-1:1992 42. https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/cpe_inen_5%20Parte_9-1.pdf. Ecuador.

Pacheco A. y Guadamud E. (2022). Diseño de la red de distribución de agua potable de la comunidad de Manglaralto, Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Guayaquil, Ecuador.

WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO). (2019). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás, ISBN 978-92-3-300108-4. UNESCO, París, Francia.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Adrian Steven Pacheco Peñafiel https://orcid.org/0000-0003-3392-8019

Realizó y participo en todas las fases de este proyecto, tanto en las visitas y trabajo de campo, como en la redacción e interpretación de los datos.

Evaluación de algunas expresiones unificadas para el factor de fricción de Darcy-Weisbach

Juan Camilo Castro Velásquez E-MAIL: juan.castro-v@mail.escuelaing.edu.co
Departamento de Ingeniería Informática, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Sebastián Pérez Ocampo E-MAIL: sebastian.perezo@campusucc.edu.co
Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Cooperativa de Colombia.

Juan David Rincón Vanegas E-MAIL: jurinconva@unal.edu.co
Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia.

RESUMEN

En el diseño de conducciones para el transporte de fluidos se emplean diferentes ecuaciones para determinar el factor de fricción en régimen laminar y turbulento, ahora bien, es posible que existan variaciones importantes de los diferentes parámetros inmersos en el fenómeno físico, que cambien significativamente el régimen de flujo laminar hacia turbulento o viceversa. Por lo anterior, resulta práctico contar con expresiones unificadas que sean aplicables sin importar el patrón del flujo. En este orden de ideas, a través del tiempo algunos investigadores han propuesto formulaciones para tal fin, sin embargo, resulta totalmente necesario validar, sobre todo, las ecuaciones modernas, con el objetivo de establecer la precisión y, por consiguiente, la confiabilidad de los resultados que cada expresión proporciona.

PALABRAS CLAVES: factor de fricción de Darcy-Weisbach, flujo laminar, flujo turbulento, hidráulica de tuberías, mecánica de fluidos.

Evaluation of some unified expressions for the Darcy-Weisbach friction factor

ABSTRACT

In the design of pipelines for the transport of fluids, different equations are used to determine the friction factor in laminar and turbulent regimes. However, it is possible that there are important variations of the different parameters involved in the physical phenomenon, which significantly change the laminar flow regime to turbulent or vice versa. Therefore, it is practical to have unified expressions that are applicable regardless of the flow pattern. In this order of ideas, over time some researchers have proposed formulations for this purpose, however, it is absolutely necessary to validate, especially the modern equations, in order to establish the accuracy and, therefore, the reliability of the results that each expression provides.

KEYWORDS: Darcy-Weisbach friction factor, fluid mechanics, laminar flow, pipe hydraulics, turbulent flow.

CITMA CERTIFICADO

Marzo 2024-RECIBIDO *APROBADO-Abril 2024*

Esta obra está bajo una licencia internacional creative commons attribution-noncommercial 4.0

CC BY NC

SciELO

01 INTRODUCCIÓN

Para empezar, en el diseño de conducciones para el transporte de fluidos se emplean diferentes ecuaciones para establecer el factor de fricción en régimen laminar y turbulento, pero es posible que existan variaciones importantes de los diferentes parámetros inmersos en el fenómeno físico, que cambien significativamente el régimen de flujo laminar hacia turbulento (flujo hidráulicamente liso o rugoso) o viceversa.

Ahora bien, diversos investigadores han propuesto formulaciones que abarcan todos los regímenes de flujo, sin embargo, se desconoce, sobre todo en las expresiones más vanguardistas, la precisión y, por ende, la confiabilidad de estas.

No obstante, es importante destacar que Díaz-Damacillo et al. (2020) realizó la evaluación, según la expresión de Colebrook-White, de dos ecuaciones en cuestión relativamente modernas; la propuesta de Brkić and Praks (2018) y Díaz-Damacillo and Plascencia (2019). En efecto, los investigadores encontraron que, para algunos valores de ε entre el rango $10^2 \leq R_e \leq 10^9$, el error relativo máximo fue 10,02% y 9,83% de forma respectiva.

Por último y, ante cierta incertidumbre en relación con este tipo de formulaciones, en esta investigación se evaluarán las ecuaciones presentadas, por medio del algoritmo CPR hecho por los autores, con el objetivo de establecer la precisión y, por consiguiente, la confiabilidad de los resultados que cada expresión proporciona.

02 ECUACIONES UNIFICADAS PARA DETERMINAR EL FACTOR DE FRICCIÓN DE DARCY-WEISBACH

Antes que todo, no es ocioso recordar que el factor de fricción, en régimen laminar, se deriva de la ecuación de Hagen—Poiseuille y Darcy—Weisbach, por lo tanto, resulta que:

$$f = \frac{64}{R_e} \tag{1}$$

Por otro lado y, en un principio diseñada para determinar el factor de fricción en régimen transicional, se tiene la formulación de Colebrook—White (1939):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log_{10}\left(\frac{k_s}{3{,}7 \cdot d} + \frac{2{,}51}{R_e \cdot \sqrt{f}}\right) \tag{2}$$

donde: R_e, número de Reynolds.

f, factor de fricción de Darcy—Weisbach.

k_s, rugosidad absoluta de la tubería.

d, diámetro de la tubería.

$\varepsilon = k_s/d$, rugosidad relativa.

Por lo demás, cabe mencionar que la expresión (2) probó ser válida para todo tipo de flujo turbulento en tuberías; sin embargo, al ser esta una ecuación implícita para el factor de fricción implica la necesidad de utilizar algún método numérico para calcularlo (Saldarriaga 2016).

FORMULACIÓN DE CHURCHILL

Churchill (1977) desarrolló la siguiente formulación que, según el autor, es válida para todo número de Reynolds R_e, y rugosidad relativa ε.

$$f = 8 \cdot \left[\left(\frac{8}{R_e} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{3/2}} \right]^{1/12} \tag{3}$$

donde:

$$A = \left[2{,}457 \cdot \ln \left(\frac{1}{\left(\frac{7}{R_e} \right)^{0{,}9} + 0{,}27 \cdot \varepsilon} \right) \right]^{16} \quad ; \quad B = \left(\frac{37530}{R_e} \right)^{16}$$

Es importante indicar, que la parte turbulenta de la expresión (3) se basa en la aproximación hecha por Churchill para la ecuación de Colebrook−White (Churchill 1973).

FORMULACIÓN DE SWAMEE

Swamee (1993) planteó la siguiente expresión:

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{R_e} \right)^{8} + 9{,}5 \cdot \left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3{,}7} + \frac{5{,}74}{R_e{}^{0{,}9}} \right) - \left(\frac{2500}{R_e} \right)^{6} \right]^{-16} \right\}^{0{,}125} \tag{4}$$

Ahora bien, cabe resaltar que el autor no define explícitamente el rango de aplicación para la expresión (4), sin embargo, el autor evalúa la ecuación anterior en los intervalos dados por el diagrama de Moody (1944), por consiguiente, se puede deducir que dicha formulación es válida para todo el rango del diagrama mencionado.

Por lo demás, no es ocioso señalar que la expresión (4) considera la aproximación de Swamee y Jain (1976) para la ecuación de Colebrook−White.

FORMULACIÓN DE CHENG

Cheng (2008) estableció la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{R_e}{64} \right)^{\alpha} \cdot \left[1{,}8 \cdot \log_{10} \left(\frac{R_e}{6{,}8} \right) \right]^{2 \cdot (1-\alpha) \cdot \beta} \left[2 \cdot \log_{10} \left(\frac{3{,}7}{\varepsilon} \right) \right]^{2 \cdot (1-\alpha) \cdot (1-\beta)} \tag{5}$$

donde:

$$\alpha = \frac{1}{1 + \left(\frac{R_e}{R_{e_{LT}}} \right)^{m}} \quad ; \quad R_{e_{LT}} = 2720 \quad ; \quad m = 9 \quad ; \quad \beta = \frac{1}{1 + \left(\frac{R_e}{R_{e_{SR}}} \right)^{n}} \quad ; \quad R_{e_{SR}} = \frac{\eta \cdot d}{k_s}$$

$$\eta = 320 \quad ; \quad n = 2$$

Es relevante anotar, que la expresión anterior sigue los resultados obtenidos por el experimento de Nikuradse (1950).

FORMULACIÓN PRÁCTICA DE LA INGENIERÍA RUSA

A. Chernikin y B. Chernikin (2012), desarrollaron la siguiente formulación:

$$f = 0{,}11 \cdot \left(\frac{\alpha + \varepsilon + X^{1{,}4}}{115 \cdot X + 1}\right)^{0{,}25} \tag{6}$$

donde:

$$\alpha = \frac{68}{R_e} \;\; ; \;\; X = (28 \cdot \alpha)^{10}$$

Ahora, cabe aclarar que la parte turbulenta de la formulación (6) se basa en una expresión hecha en 1982 por un investigador ruso, de hecho, dicha ecuación se usa comúnmente en Rusia en lugar de la formulación de Colebrook–White, cuando se diseñan y operan redes para el transporte de petróleo crudo (A. Chernikin and B. Chernikin 2012).

Por último y, con respecto a la incertidumbre del rango de aplicación para la expresión (6), Brkić and Praks (2018) corroboraron que, para valores pequeños de rugosidad relativa entre $10^{3{,}7} \leq R_e \leq 10^{5{,}8}$, las ecuaciones (2 y 6) producen resultados casi idénticos, no obstante, a medida que el valor de la rugosidad relativa aumenta el resultado obtenido por la formulación (6) se aleja del adquirido por Colebrook–White (expresión 2), situación que, según Brkić and Praks (2018), es cuestionable.

FORMULACIÓN DE BRKIĆ Y PRAKS

Brkić and Praks (2018), propusieron la siguiente ecuación que, infiriendo por sus resultados obtenidos, es válida para todo el rango del diagrama de Moody (1944).

$$f = \frac{64}{R_e} \cdot (1 - y_1) + \frac{0{,}316}{{R_e}^{0{,}25}} \cdot (y_1 - y_3) + \frac{0{,}25}{\log^2{}_{10}\left(\frac{\varepsilon}{3{,}71}\right)} \cdot y_2 \tag{7}$$

donde:

$$y_1 = 1 - \frac{1048}{\frac{4{,}489}{10^{20}} \cdot {R_e}^6 \cdot \left(0{,}148 \cdot R_e - \frac{2{,}306 \cdot R_e}{0{,}003133 \cdot R_e + 9{,}646}\right) + 1050}$$

$$y_2 = 1{,}012 - \frac{1}{0{,}02521 \cdot R_e \cdot \varepsilon + 2{,}202}$$

$$y_3 = 1 - \frac{1}{0{,}000389 \cdot {R_e}^2 \cdot \varepsilon^2 + 0{,}0000239 \cdot R_e + 1{,}61}$$

Para acabar, cabe subrayar que la formulación (7) considera el comportamiento flexional de Nikuradse (1950).

FORMULACIÓN DE DÍAZ–DAMACILLO Y PLASCENCIA

Díaz–Damacillo and Plascencia (2019), plantearon una expresión que, un tiempo más tarde, fue modificada por Díaz–Damacillo et al. (2020). La formulación actualizada que, según los autores es aplicable para una amplia gama de valores de R_e y ε (Díaz–Damacillo et al. 2020), viene dada por:

$$f = \frac{64}{R_e} + \frac{\lambda_1}{1 + e^{\left(\frac{\tau_1 - R_e}{100}\right)}} + \frac{\lambda_2}{1 + e^{\left(\frac{\tau_2 - R_e}{150} \cdot \varepsilon\right)}} \tag{8}$$

donde:

$$\lambda_1 = 0{,}02 \;;\; \tau_1 = 3000 \;;\; \lambda_2 = \left|\lambda_1 - \left[\frac{1}{-2\cdot\log_{10}\left(\frac{1}{3{,}71}\cdot\varepsilon\right)}\right]^2\right|$$

$$\tau_2 = \frac{0{,}77505}{\varepsilon^2} - \frac{10{,}984}{\varepsilon} + 7953{,}8$$

Por lo demás, cabe resaltar que la ecuación (8) sigue la conducta flexional de Nikuradse (1950).

FORMULACIÓN DE AVCI Y KARAGOZ

Avci y Karagoz (2019), desarrollaron la siguiente formulación que, infiriendo por sus resultados adquiridos, es válida para todo el rango del gráfico de Moody (1944).

$$f = f_t + \left(\frac{64}{R_e} - f_t\right)\cdot e^{-\left(\frac{C_m\cdot R_e}{2560}\right)^8} \tag{9}$$

donde:

$$C_m = 1 + \varepsilon + \frac{\varepsilon\cdot\sqrt{\varepsilon}}{1+225\cdot\varepsilon^3} + 500\cdot\varepsilon^4$$

Ahora bien, es significativo señalar que la función f_t hace referencia al factor de fricción calculado en régimen turbulento, por ende y, según el trabajo realizado por Avci y Karagoz (2009), dicho factor resulta que:

$$f_t = \frac{6{,}4}{\left\{\ln\left[\frac{1}{R_e} + 0{,}01\cdot\varepsilon\cdot\left(1 + \frac{10\cdot\sqrt{\varepsilon}}{1+225\cdot\varepsilon^2} + 5000\cdot\varepsilon^3\right)\right]\right\}^{2{,}4}}$$

Para terminar, es crucial anotar que la expresión (9) prosigue el comportamiento monotónico de Colebrook–White.

VARIANTE PARA LA FORMULACIÓN DE AVCI Y KARAGOZ

Milošević et al. (2022), introdujeron la ecuación que recomienda Brkić and Praks (2020) para el factor de fricción en régimen turbulento f_t, que se encuentra inmerso en la función general obtenida por Avci y Karagoz (2019). En este orden de ideas, la formulación resultante es la siguiente.

$$f = f_t + \left(\frac{64}{R_e} - f_t\right)e^{-\left(\frac{C_m\cdot R_e}{2560}\right)^8} \tag{10}$$

donde:

$$\frac{1}{\sqrt{f_t}} = 0{,}8685972\cdot\left(B - C + \frac{C}{x - 0{,}5588\cdot C + 1{,}2079}\right) \;;\; A = \frac{R_e\cdot\varepsilon}{8{,}0897}$$

$$B = \ln(R_e) - 0{,}779626 \;;\; C = \ln(x) \;;\; x = A + B$$

Para finalizar, es notable aludir que la función f_t puede ser cualquier propuesta coherente que se haya realizado a través del tiempo.

FORMULACIÓN DE MILOŠEVIĆ, BRKIĆ, PRAKS, LITRIČIN Y STAJIĆ

Milošević et al. (2022), reportan la siguiente formulación que fue desarrollada mediante regresión simbólica.

$$f = \frac{61{,}395}{R_e} + \frac{0{,}024444 + 0{,}60915 \cdot \varepsilon}{e^{\left(\frac{8188400}{{R_e}^2}\right)}} \tag{11}$$

Ahora bien, es fundamental indicar que la expresión (11) fue evaluada para una rugosidad relativa de 0,05 entre el rango $0 \leq R_e \leq 10^{3{,}78}$, obteniendo resultados similares a los conseguidos por la ecuación (7).

En suma, cabe acentuar que la formulación (11) sigue la conducta flexional de Nikuradse (1950), aunado a ello, es relevante señalar que, según el conocimiento actual de los autores, la expresión (11), de acuerdo con la temática correspondiente, es la más contemporánea.

03 ALGORITMO CPR

Para iniciar, el algoritmo CPR, desarrollado por los autores, es una herramienta programada en el lenguaje Python (versión 3.11 o 3.12), cuyo objetivo es evaluar los resultados obtenidos por las ecuaciones aproximadas, en relación con las formulaciones (1 y 2). En este orden de ideas, los autores disponen a los interesados el algoritmo en un repositorio de GitHub (https://github.com/BlutLucifugeKrieger/CPR-Algorithm), con el fin de satisfacer cualquier tipo de exigencia académica u ocupacional.

Por lo demás, a continuación, dejando un poco de lado la programación a fondo del CPR, se resumen las características más importantes en las cuales se basa este; sin embargo, si el lector desea profundizar en la programación o realizar algún cambio se recomienda clonar el algoritmo que se encuentra en el repositorio mencionado.

RANGO EVALUADO PARA EL NÚMERO DE REYNOLDS Y LA RUGOSIDAD RELATIVA

Las condiciones adoptadas para el régimen laminar, transicional y turbulento se establecieron en $R_e \leq 2000$, $2000 < R_e < 4000$, y $R_e \geq 4000$ respectivamente (Moody 1944), por ende, el intervalo evaluado para R_e, en flujo laminar y turbulento, fue $10^{-10} \leq R_e \leq 2000$ y $4000 \leq R_e \leq 10^8$ correlativamente, por otra parte, el rango evaluado para la rugosidad relativa fue $10^{-10} \leq \varepsilon \leq 0{,}05$; no obstante, el usuario podrá seleccionar el rango que desee en el CPR, aunque los autores recomiendan que el límite inferior no sea igual a cero, ya que dicho punto es problemático.

DISTRIBUCIÓN DE LA MUESTRA (PUNTOS CUASI ALEATORIOS DE SOBOL)

El método de Sobol cuasi—Monte Carlo llena el espacio de posibilidades de manera más uniforme en el rango de una muestra, por ende, los números de Sobol generados ofrecen una menor discrepancia entre sí, lo cual hace que se obtengan puntos que abarquen eficientemente el intervalo de una muestra (Brkić and Praks 2022).

En este sentido, las secuencias de Sobol proporcionan $n = 2^m$ puntos en el intervalo $[0, 1)^d$, donde d es la dimensionalidad de la secuencia. Por otro lado, es importante resaltar que Brkić and Praks (2022) concluyeron que, con $m = 6$, es suficiente para obtener resultados aceptables sin necesidad de evaluar las infinitas posibilidades.

Por lo anterior, para el desarrollo específico de este trabajo los autores eligieron un $m = 10$, es decir, 1024 puntos para el intervalo del número de Reynolds y la rugosidad relativa, de hecho, el índice total de los vectores resultantes, conforme a la cantidad de puntos de R_e y ε, es 1024^2. No

obstante, el usuario puede seleccionar un valor diferente para m, según las necesidades que este requiera, pero sin que m sea mayor que trece, ya que para valores más grandes se debe disponer de un equipo de gran capacidad computacional y, aunado a ello, se tendrá que modificar un parámetro denominado "bits", que hace parte del instrumento que se describe próximamente.

Ahora bien, el método mencionado es un procedimiento complejo que requiere una herramienta computacional. En este orden de ideas, en Python existe un motor denominado Sobol, que hace parte del sub-módulo cuasi−Monte Carlo de la librería SciPy de código abierto, por lo tanto, los autores implementaron dicho motor en este trabajo.

En otro sentido, cabe destacar que actualmente en el motor Sobol existen dos métodos de optimización para mejorar la calidad de la muestra; "random-cd" y "lloyd", por ende, los autores utilizaron ambas metodologías, no obstante, el usuario definirá si desea o no implementar algún método mencionado.

Para terminar, si el lector requiere saber cómo usar el motor de Sobol o conocer más sobre este se recomienda acceder a la documentación de dicho sub-módulo (The SciPy Community 2023).

DESARROLLO DE LA ECUACIÓN DE COLEBROOK−WHITE

El método numérico utilizado por los autores para solucionar la ecuación de Colebrook−White fue el de Newton−Raphson, el cual, por lo general, sólo requiere tres iteraciones para que el método converja (Saldarriaga 2016), de hecho, Brkić (2011) afirma que normalmente se necesita menos de siete iteraciones.

En este sentido y, para el desarrollo de este trabajo, los autores eligieron siete iteraciones para el método mencionado.

CUANTIFICACIÓN DEL ERROR RELATIVO

Para comenzar, es importante señalar que los valores obtenidos para el error relativo se programaron en cada régimen de flujo (laminar y turbulento), es decir, se caracterizó ambas zonas, con el fin de identificar exclusivamente el error en el régimen dado.

Por lo anterior, las fórmulas programadas para cuantificar el error mencionado son las siguientes:

$$L_{RE}(\%) = 100 \cdot \left(\frac{f_{\text{Hagen−Poiseuille}} - f_{aproximación}}{f_{\text{Hagen−Poiseuille}}} \right)$$

$$T_{RE}(\%) = 100 \cdot \left(\frac{f_{Colebrook−White} - f_{aproximación}}{f_{Colebrook−White}} \right)$$

donde: L_{RE}, error relativo mínimo, promedio o máximo en régimen laminar.

T_{RE}, error relativo mínimo, promedio o máximo en régimen turbulento.

Finalmente, es indispensable aclarar que el error relativo promedio no es obtenido por el promedio entre el error relativo mínimo y máximo, sino que dicho error se adquiere como el promedio de toda la cantidad de datos que pueden existir en el vector del error relativo, siguiendo el régimen de flujo correspondiente.

04 RESULTADOS

Antes que nada, es pertinente resaltar que en los siguientes resultados se obtuvo un mayor número de decimales, pero, por practicidad, los autores sólo consideraron tres decimales truncados para cada uno de ellos.

A continuación, se presentan las tablas (1, 2 y 3), donde se exponen los resultados adquiridos por el algoritmo CPR para cada modelo, de hecho, se resaltan las formulaciones con mejores resultados.

Tabla 1. Error relativo de las ecuaciones evaluadas para régimen laminar y turbulento (muestreo tipo Sobol)

Autor y ecuación	Régimen de flujo					
	Laminar			Turbulento		
	L_{RE} mínimo	L_{RE} promedio	L_{RE} máximo	T_{RE} mínimo	T_{RE} promedio	T_{RE} máximo
Churchill (3)	0,000	0,003	0,131	4,543E-07	0,058	3,103
Swamee (4)	0,000	0,005	0,598	1,919E-08	0,033	1,401
Cheng (5)	0,000	0,242	2,909	3,243E-04	0,064	40,534
A. Chernikin y B. Chernikin (6)	5,589E-07	0,196	3,457	3,575E-04	16,217	46,818
Brkić y Praks (7)	5,852E-06	14,057	58,378	1,192E-04	1,169	86,337
Díaz–Damacillo et al. (8)	0,000	8,956	25,276	2,074E-06	1,160	236,639
Avci y Karagoz (9)	0,000	1,628	30,425	2,765E-05	0,967	3,106
Brkić y Praks (10)	0,000	1,745	31,435	1,175E-04	0,103	0,124
Marko Milošević et al. (11)	3,060E-05	3,986	17,958	1,302E-03	22,890	311,438

Tabla 2. Error relativo de las ecuaciones evaluadas para régimen laminar y turbulento (muestreo tipo Sobol–optimización por "random-cd")

Autor y ecuación	Régimen de flujo					
	Laminar			Turbulento		
	L_{RE} mínimo	L_{RE} promedio	L_{RE} máximo	T_{RE} mínimo	T_{RE} promedio	T_{RE} máximo
Churchill (3)	0,000	0,003	0,131	4,543E-07	0,058	3,103
Swamee (4)	0,000	0,005	0,598	1,919E-08	0,033	1,401
Cheng (5)	0,000	0,242	2,909	3,243E-04	0,064	40,534
A. Chernikin y B. Chernikin (6)	5,589E-07	0,196	3,457	3,575E-04	16,217	46,818
Brkić y Praks (7)	5,852E-06	14,057	58,378	1,192E-04	1,169	86,337
Díaz–Damacillo et al. (8)	0,000	8,956	25,276	2,074E-06	1,160	236,639
Avci y Karagoz (9)	0,000	1,628	30,425	2,765E-05	0,967	3,106
Brkić y Praks (10)	0,000	1,745	31,435	1,175E-04	0,103	0,124
Marko Milošević et al. (11)	3,060E-05	3,986	17,958	1,302E-03	22,890	311,438

Tabla 3. Error relativo de las ecuaciones evaluadas para régimen laminar y turbulento (muestreo tipo Sobol–optimización por "lloyd")

Autor y ecuación	Régimen de flujo					
	Laminar			Turbulento		
	L_{RE} mínimo	L_{RE} promedio	L_{RE} máximo	T_{RE} mínimo	T_{RE} promedio	T_{RE} máximo
Churchill (3)	0,000	0,004	0,131	4,092E-07	0,059	3,103
Swamee (4)	0,000	0,006	0,598	5,945E-07	0,035	1,401
Cheng (5)	0,000	0,248	2,909	3,243E-04	0,083	40,534
A. Chernikin y B. Chernikin (6)	1,434E-06	0,203	3,457	1,193E-03	16,255	46,818
Brkić y Praks (7)	6,980E-06	14,099	58,378	1,270E-04	1,178	86,337
Díaz–Damacillo et al. (8)	0,000	8,958	25,276	8,154E-06	1,535	236,639
Avci y Karagoz (9)	0,000	1,663	30,425	7,522E-05	0,963	3,106
Brkić y Praks (10)	0,000	1,782	31,435	1,175E-04	0,103	0,124
Marko Milošević et al. (11)	5,088E-06	4,007	17,958	6,542E-02	23,272	311,438

Por último, la muestras generadas por el motor Sobol, tanto para R_e y ε, fueron las mismas en cada evaluación; sin embargo, si el usuario desea que en cada ejecución del CPR las muestras cambien, deberá insertar su decisión en el input, cuando el algoritmo se lo requiera. En todo caso, se recomienda consultar la documentación asociada para más información.

05 CONCLUSIONES

Para comenzar, es importante destacar que las ecuaciones presentadas siguen el comportamiento monotónico de Colebrook—White o el flexional de Nikuradse. Por lo tanto, resulta claro que las expresiones basadas en los resultados de Nikuradse sean las de menor precisión, puesto que la evaluación se realizó con respecto a la formulación universalmente aceptada; la ecuación de Colebrook—White.

En este orden de ideas, es notable enfatizar que los resultados obtenidos son equivalentes, de hecho, el resultado del muestreo general de Sobol (tabla 1) con el logrado por el método de optimización "random-cd" (tabla 2), son idénticos, aunque en realidad, esta casualidad se debe al recorte realizado de los decimales inmersos en cada resultado.

Por otro lado, los autores establecieron que, según el muestreo de puntos cuasi aleatorios de Sobol alcanzados por el CPR, las ecuaciones con menor error relativo máximo, para régimen laminar y turbulento, son las propuestas de Churchill (1977) y Brkić and Praks (2020) [expresión dada en Milošević et al. (2022)] respectivamente.

No obstante, los autores concluyen que, teniendo en cuenta los resultados obtenidos para el error relativo promedio en ambos regímenes de flujo, la formulación de Swamee (1993) es la más adecuada, aunque no se descarta la expresión de Churchill (1977), ya que la diferencia del error cometido en cuestión por ambas ecuaciones, para flujo laminar y turbulento, no es muy contundente.

En otro sentido, es posible realizar diferentes pruebas adicionales con el algoritmo CPR, ya que este cuenta con la practicidad de validar eficazmente diversas condiciones para las funciones presentadas en este trabajo, en cualquier caso y, para casos extraordinarios, se recomienda consultar previamente la documentación del motor Sobol.

En suma, los autores consideran que, conforme a los resultados presentados y de acuerdo con los requerimientos específicos para cada caso, el lector determine qué ecuación le resulta más conveniente utilizar.

06 REFERENCIAS

Avci A. and Karagoz I. (2009). "A novel explicit equation for friction factor in smooth and rough pipes", Journal of Fluids Engineering, vol. 131, no. 6, pp. 1—4, ISSN 0098-2202, Turquía.

Avci A. and Karagoz I. (2019). "A new explicit friction factor formula for laminar, transition and turbulent flows in smooth and rough pipes", European Journal of Mechanics, vol. B, no. 78, pp. 182—187, ISSN 0997-7546, Turquía.

Brkić D. (2011). "Review of explicit approximations to the Colebrook relation for flow friction", Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 77, no. 1, pp. 34—48, ISSN 0920-4105, Serbia.

Brkić D. and Praks P. (2018). "Unified friction formulation from laminar to fully rough turbulent flow", Applied Sciences, vol. 8, no. 11, pp. 1—13, ISSN 2076-3417, Serbia.

Brkić D. and Praks P. (2020). "Review of new flow friction equations: Constructing Colebrook's explicit correlations accurately", Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, vol. 36, no. 1, pp. 1—8, ISSN 0213-1315, Serbia.

Brkić D. and Praks P. (2022). "Approximate flow friction factor: Estimation of the accuracy using Sobol's Quasi-random sampling", Axioms, vol. 11, no. 36, pp. 1—8, ISSN 2075-1680, Serbia.

Cheng N. (2008). "Formulas for friction factor in transitional regimes", Journal of Hydraulic Engineering, vol. 134, no. 9, pp. 1357—1362, ISSN 1943-7900, Singapur.

Chernikin A. and Chernikin B. (2012). "Обобщенная формула для расчета коэффициента гидравлического сопротивления магистральных трубопроводов для светлых нефтепродуктов и маловязких нефтей (En ruso)", наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов, vol. 8, no. 4, pp. 64—66, ISSN 2541-9595, Rusia.

Churchill W. (1973). "Empirical expressions for the shear stress in turbulent flow in commercial pipe", AIChE Journal, vol. 19, no 2, pp. 375—376, ISSN 0001-1541, Universidad de Pensilvania.

Churchill W. (1977). "Friction-factor equation spans all fluid-flow regimes", Chemical Engineering, vol. 84, no. 24, pp. 91—92, ISSN 1873-3212, New York. EEUU.

Colebrook C. and White C. (1939). "Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws", Journal of the Institution of Civil Engineers, vol. 11, no. 4, pp. 133—156, ISSN 0368-2455.

Díaz—Damacillo L. and Plascencia G. (2019). "A new six parameter model to estimate the friction factor", AIChE Journal, vol. 65, no. 4, pp. 1144—1148, ISSN 0001-154, México.

Díaz—Damacillo L. Plascencia G. and Robles—Agudo M. (2020). "On the estimation of the friction factor: a review of recent approaches", SN Applied Sciences, vol. 2, no. 163, pp. 1—13, ISSN 3004-9261, México.

Milošević M. Brkić D. Praks P. Litričin D. and Stajić Z. (2022). "Hydraulic losses in systems of conduits with flow from laminar to fully turbulent: A new symbolic regression formulation", Axioms, vol. 11, no. 5, pp. 1—11, ISSN 2075-1680.

Moody L. (1944). "Friction factors for pipe flow", Journal of Fluids Engineering, vol. 66, no. 8, pp. 671—678, ISSN 0098-2202.

Nikuradse J. (1950). "Laws of flow in rough pipes", National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, extraído de: https://ntrs.nasa.gov/citations/19930093938, en enero 2024.

Saldarriaga J. (2016). "Hidráulica de tuberías", Editorial Alfaomega, tercera edición, ISBN 978-958-682-971-7, Bogotá, Colombia.

Swamee P. (1993). "Design of a submarine oil pipeline". Journal of Transportation Engineering, vol. 119, no. 1, pp. 159—170, ISSN 2473-2893.

Swamee P. and Jain A. (1976). "Explicit equations for pipe flow problems", Journal of the Hydraulics Division, vol. 102, no. 5, pp. 657—664, ISSN 1943-7900.

The SciPy Community. (2023). "Scipy.stats.qmc.Sobol", extraído de: https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.qmc.Sobol.html, en enero 2024.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Juan Camilo Castro Velásquez https://orcid.org/0009-0006-1914-9704
Trabajó en el desarrollo del modelo computacional y en la redacción del documento

Sebastián Pérez Ocampo https://orcid.org/0009-0002-8359-0167
Trabajó en la recolección de información y en la redacción del documento

Juan David Rincón Vanegas https://orcid.org/0000-0001-9932-3253
Trabajó en el desarrollo del modelo computacional y en la redacción del documento

Evaluación del impacto de las variables bioclimáticas en el consumo: Caso estudio Sector de Aguas de La Habana.

MARIO RAMOS JOSEPH E-MAIL: mramos@ahabana.co.cu
Empresa Aguas de La Habana, Fomento y Recreo, Palatino, Cerro, La Habana, Cuba

RENIEL CARVAJAL ALFONSO E-MAIL: rcarvajal@ahabana.co.cu
Empresa Aguas de La Habana, Fomento y Recreo, Palatino, Cerro, La Habana, Cuba

ALCIDES J. LEÓN MÉNDEZ E-MAIL: aleonm@civil.cujae.edu.cu
Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana, Cuba.

RAISA SOCORRO LLANES E-MAIL: aleonm@civil.cujae.edu.cu
Facultad de Ingeniería Informática, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana, Cuba.

RESUMEN

Cada día aumenta la necesidad de gestionar de forma más eficiente los recursos naturales, entre estos el agua se mantiene como elemento primordial, por su importancia para la salud, actividad y desarrollo humanos. Garantizar la demanda a corto, mediano y largo plazo se ha convertido en un gran desafío para investigadores y gestores de agua en todo el planeta. En este trabajo se utiliza un modelo de series temporales para evaluar el impacto de las variables bioclimáticas en el consumo. Este modelo se aplica a diferentes horizontes de consumo histórico en un sector operado por Aguas de La Habana. Se comprueba el efecto novedoso que tienen estas variables bioclimáticas en la predicción de la demanda doméstica. Los resultados obtenidos aportan valores de r2 ajustada que oscilan entre 0,69 y 0,79.

PALABRAS CLAVES: demanda de agua, ensemble, horizonte de predicción, series temporales, variables bioclimáticas.

Evaluation of the impact of bioclimatic variables on consumption: Case study of the Aguas de La Habana sector.

ABSTRACT

Every day it increases the necessity to negotiate in a more efficient way the natural resources, among these the water stays as primordial element, for its importance for the health, activity and development humans. To guarantee the demand to short, medium and I release term he/she has become a great challenge for investigators and agents of water in the whole planet. In this work a model of temporary series is used to evaluate the impact of the variable bioclimatic in the consumption. This model is applied to different horizons of historical consumption in a sector operated by Waters of Havana. It is proven the novel effect that you/they have these variable bioclimatic in the prediction of the domestic demand. The obtained results contribute securities of r2 squared that oscillate between 0,69 and 0,79.

KEYWORDS: water demand, ensemble, prediction horizon, time series, bioclimatic variables

CITMA CERTIFICADO

Marzo 2024-RECIBIDO *APROBADO-Abril 2024*

Esta obra está bajo una licencia internacional creative commons attribution-noncommercial 4.0

SciELO

01 INTRODUCCIÓN

Entre los principales desafíos que enfrenta la humanidad se encuentra el de la explotación racional del agua, un recurso indispensable y cuya desigual distribución en el planeta conjuntamente con la aparición simultánea de eventos extremos ha provocado la aparición de prolongadas sequías, inundaciones y ciclones.

Ante este escenario, aquellos estudios con la perspectiva de un uso racional y eficiente del agua, así como la predicción de la demanda, son una herramienta necesaria para las empresas de abasto. Una de las necesidades más perentorias en toda empresa de abasto es conocer la demanda de agua de sus clientes y los principales factores que afectan a la misma (Hao, 2022).

De Souza et al. (2019) y Hao et al. (2022) destacan en sus trabajos, que en la actualidad coexisten innumerables métodos para predecir la demanda de agua utilizados por los expertos tales como: Bosque Aleatorio (Random Forest, RF por sus siglas en inglés), Maquina de Vectores de Soportes (Support Vector Machine, SVM por sus siglas en inglés), Redes Neuronales Artificiales (Artificial Neural Network, ANN por sus siglas en inglés) y los Sistemas de Inferencia Neuro Difuso Adaptativo (Adaptative Neuro Fuzzy Inferential System, ANFIS por sus siglas en inglés).

Avalado por los recientes desarrollos realizados, en minería de datos e inteligencia artificial, se han logrado excepcionales avances en su aplicación a prácticamente todas las esferas del conocimiento y dentro de esta la aplicación al mundo de la gestión de los recursos hídricos. A esto se une el cambio climático y sus efectos (Hao et al., 2022) y (De Souza et al., 2019).

Entre los principales métodos se encuentran los que aplican la regresión. La regresión es un método estadístico utilizado para analizar la relación entre variables (DDmáx, 2022) y (Alshaikhli et al., 2021). Es el método más sencillo entre los utilizados para predecir el consumo de agua potable.

Las técnicas de regresión han sido muy utilizadas en estudios para analizar la relación entre el consumo de agua potable y otros factores como la calidad del agua, la infraestructura de distribución y el precio del agua, (Arellano y Peña, 2020). En la regresión lineal simple solo se utiliza una variable independiente para predecir la variable dependiente. Se puede definir la velocidad del viento como variable independiente para con ella predecir el consumo de agua potable (variable dependiente). La regresión lineal múltiple utiliza varias variables independientes, para predecir una variable dependiente. En este caso, las variables independientes pueden ser la población, el clima y el uso del agua, o la densidad poblacional y se reconocen como variables predictoras (Alshaikhli et al., 2021).

Alshaikhli et al. (2021) investigaron los determinantes del consumo de agua en el estado de Qatar, centrándose en los factores vinculados a los meses estacionales mediante el uso de un modelo de regresión lineal múltiple. Los resultados del modelo desarrollado se expresan en una ecuación de regresión y demuestran que un incremento en la temperatura está asociado con un incremento en el consumo doméstico de agua per cápita de 6,523 litros diarios. Y contrariamente a lo anterior, un incremento en la densidad de la población se correlaciona con una disminución del consumo per cápita de agua.

El estudio en Qatar se llevó a cabo sobre una variable dependiente (consumo de agua per cápita), en relación con varias variables independientes (densidad de población, temperatura, humedad, precipitaciones, luz diurna y luz solar) con el objetivo de utilizar la regresión lineal múltiple para describir el impacto del efecto de las variables climáticas y poblacionales en el consumo de agua per cápita en Qatar. Este estudio permitió comprender el efecto combinado de varias influencias en el uso doméstico del agua en Qatar. A pesar de la inclusión de variables socio-demográficas, como

resultado de este modelo de regresión se muestra que el factor climático de la temperatura influye significativamente en la demanda urbana del agua (Alshaikhli et al., 2021).

Mientras tanto en Ecuador un reporte incluyó factores socio-demográficos, socio-económicos, gestión y calidad del agua para definir los modelos matemáticos que predicen el consumo de agua potable residencial. Se aplicaron dos modelos de regresión múltiples, el primero implica 19 variables y el segundo tan solo 6. Se evaluaron los efectos de las variables que influyen en el consumo del agua potable, obteniéndose como resultado, que solamente las variables "número de personas por vivienda" y "nivel de ingresos económicos" de las 19 presentadas, inciden significativamente en el consumo semestral de agua potable. Mientras tanto en el segundo modelo las variables climatológicas “humedad atmosférica máxima” y “temperatura máxima” tienen más significancia estadística que las otras 4 variables que intervienen en el consumo mensual de agua potable (Arellano y Peña, 2020).

En Cuba la empresa Aguas de La Habana gestiona el abasto de agua a la capital. Desde el año 2010, se creó un grupo ad hoc para el estudio de la demanda de agua del sector poblacional que atiende la empresa. El grupo liderado por el primer autor de este trabajo, ha tenido entre sus miembros a especialistas de la propia empresa que han realizado sus estudios de maestría en este tema, además de especialistas del Centro de Investigaciones Hidráulicas, el Instituto de Meteorología, y la Facultad de Informática, en el caso de estos últimos, su participación permitió un vuelco favorable en la evolución de esta investigación. Este grupo de profesionales, conjuntamente con numerosos alumnos del último año de la carrera de Ingeniería Hidráulica de la Universidad Tecnológica de La Habana, Cujae, han trabajado coordinadamente para establecer indicadores, herramientas y llegar a conclusiones que faciliten la toma de decisión. En el caso de los estudiantes, el trabajo realizado les ha servido para escribir sus trabajos de culminación de estudios. A continuación, se relacionan los principales trabajos del grupo ad hoc referenciados en Pomares (2022).

Dentro de los resultados obtenidos está el de Senovia Iglesias Granados en el año 2013, que tuvo como objetivo determinar las curvas de los patrones de consumo de un grupo de clientes domésticos con servicio diario de 24 horas (24/7), estableciendo una metodología para su determinación. Además, se determinaron las curvas de consumos clasificados para tres clientes domésticos con servicio continuo, donde se aprecian elevados consumos a bajos caudales; y, sin consumos, por encima de 750 L/h. También se determinó el tipo de contador que mejor se adecuaba a las curvas obtenidas y finalmente se determinó el volumen de pérdidas aparentes, que implicó obtener, para el sector, la curva promedio de consumo.

En el año 2015, Rosaura Socarrás Ordaz, cumple con el objetivo propuesto de determinar las curvas de consumo clasificadas de una muestra de clientes en un sector de la empresa Aguas de La Habana con servicio 24/7 durante un período de 6 meses, utilizando contadores inteligentes. Además, se determina el perfil de consumo de una muestra de 14 clientes estableciendo los horarios de mayor y menor consumo. También se determina el volumen de pérdidas aparentes producto de submedición durante el tiempo que duró el experimento y se definió el tipo de contador más idóneo para los clientes de acuerdo a su forma de consumir agua.

En el año 2017, Edelino Guilherme Foquiço, tuvo como objetivo en su trabajo determinar los patrones de consumo de una muestra de clientes de la empresa Aguas de La Habana. Para lograr el objetivo se siguen las pautas de trabajo establecidas por Socarrás Ordaz aplicadas a una muestra de 14 clientes durante un período de 25 meses y utilizando el programa de estadística multivariada Table Curve 3D, se obtienen a resultados similares al trabajo de Socarrás. Aunado a esto, se realiza un estudio pionero en Aguas de La Habana donde se determina la relación entre el consumo per cápita

doméstico y las variables climáticas y bioclimáticas en una muestra de clientes durante un período de 35 meses, determinando el efecto individual y combinado de las variables climatológicas y bioclimáticas contra el consumo. De aquí se destaca que el efecto simultáneo de las variables humedad relativa máxima y temperatura máxima provoca aumentos significativos del consumo per cápita con una correspondencia de 28,6 %. Se determina que, de las variables climatológicas, las variables de precipitación media, humedad relativa media y temperatura media son las que menos variabilidad del consumo inducen. Por último, se obtiene que, de las variables bioclimáticas, la temperatura efectiva equivalente es la variable de mayor incidencia en el consumo.

En el mismo año, en el trabajo de Jessica Romaguera Palomino, se determinan los patrones de consumo de una muestra de clientes de la empresa y su relación con variables climáticas y bioclimáticas utilizando el programa Table Curve 3D. Con este resultado se logra insertar a la empresa Aguas de La Habana, en la carrera por ganar conocimiento acerca de la influencia de la variabilidad climática en el consumo residencial y se concluyó que, al contrastar los datos de las estaciones meteorológicas de Santiago de las Vegas y Casablanca, la que mejor expresa el comportamiento bioclimático de los consumidores es esta última. Los resultados que se obtuvieron constituyen una herramienta inmediata para áreas como la operación, el planeamiento y la creación de planes de contingencia que garanticen resiliencia ante el cambio climático.

En el año 2020, David Sosa Izquierdo se trazó como objetivo caracterizar el grado de influencia de los factores climáticos y bioclimáticos en el consumo de agua residencial. En el estudio se pudo concluir que la temperatura es la variable que más afecta al consumo per cápita, siendo la precipitación la variable que mostró menos influencia.

Es importante reconocer que hasta ese momento en los estudios acerca de la influencia de las variables climáticas y bioclimáticas en el consumo de agua, utilizando herramientas estadísticas, se lograron importantes resultados de inmediata aplicación para la toma de decisiones de la empresa.

En el año 2022 se aplican por vez primera herramientas de minería de datos para el posprocesamiento de los datos. En ese año Josué Pomares Palermo logra, aplicando estas herramientas, definir la relación entre el consumo doméstico y las principales variables climatológicas y cuál de las variables bioclimáticas es la de mayor influencia. A partir de una muestra de 34 clientes para un período de 13 años, nunca antes utilizado en un análisis de este tipo, se logró determinar las variables de mayor impacto sobre el consumo. Estas variables fueron: la amplitud térmica, la humedad relativa máxima y la lámina de lluvia y para el caso de las variables bioclimáticas, la de mayor impacto sobre el consumo fue la temperatura efectiva equivalente. Con la colaboración de expertos del Instituto de Meteorología de Cuba (INSMET), se incluyó la amplitud térmica ($T_{máx}$-$T_{mín}$), como una nueva variable bioclimática (Pomares, 2022).

En una reciente contribución Ramos Joseph et al. (2023), apoyado en los resultados anteriores y utilizando técnicas de minería de datos específicamente, aplica el método de selección de variables y se logra determinar aquellas variables climáticas y bioclimáticas que impactan en el consumo, distinguiendo las que más lo afectan y se destacan como predictoras en una muestra del sector AB de Aguas de La Habana. Los experimentos fueron realizados para 6 técnicas de regresión, y se logró identificar que las variables que mejor explican el comportamiento de la demanda son: intensidad de la precipitación, velocidad máxima del viento, amplitud térmica, humedad relativa máxima y humedad relativa mínima y de acuerdo al modelo son las variables predictoras.

Relevante resultó ser, el caso de las variables bioclimáticas, de las cuales, la que más aparece es la amplitud térmica, por lo que definitivamente es la variable que se impone en este acápite, seguida

por la temperatura efectiva y la temperatura efectiva equivalente. Es de destacar el hecho de que la velocidad máxima del viento tiene en cuenta el comportamiento sensorial lo que demuestra la importancia de las variables bioclimáticas en la predicción del consumo.

Hasta este momento se ha logrado reconocer el impacto que tiene la variabilidad climática sobre el consumo en clientes de Aguas de La Habana expresado en el conocimiento adquirido en los estudios realizados. El carácter multifactorial del consumo ha obligado a incluir un mayor número de variables independientes climáticas y bioclimáticas en los estudios. Este panorama muestra la necesidad de conocer cómo evoluciona la demanda en el tiempo, que finalmente se traduce en predecir el consumo a muy corto, corto, mediano y largo plazo utilizando la minería de datos.

El objetivo de este trabajo es evaluar el impacto que tienen las variables bioclimáticas en la demanda de agua doméstica mediante un modelo de series temporales aplicado a un sector de Aguas de La Habana.

02 ESTRATEGIA DE TRABAJO UTILIZADA

En esta sección se explican las principales características del sector hidráulico seleccionado, las de los clientes de la muestra, el proceso de obtención de las variables climáticas, la herramienta de minería de datos seleccionada y el procesamiento de los datos.

Para lograr el objetivo propuesto y teniendo en cuenta los antecedentes expresados anteriormente se seleccionó un sector de la empresa que cumpliera con los requisitos necesarios (servicio 24/7, información precisa y veraz de los clientes) y al mismo tiempo estuviera claramente dentro del área de influencia de la estación meteorológica de Casablanca con los datos de las principales variables climáticas. El sector seleccionado pertenece a la empresa Aguas de La Habana y se denominara a partir de aquí sector AB.

El sector de estudio tiene como características fundamentales estar ubicado en uno de los municipios más importantes de la ciudad. Está compuesto por viviendas de la década de los años 50 del siglo pasado, las redes hidráulicas en su totalidad tienen una longitud total de algo más de 1500 metros, con más de 340 clientes fundamentalmente domésticos, distribuidos en viviendas unifamiliares y multifamiliares con servicio de agua continuo (24/7). Como a cada sector de la empresa, se le mantiene un seguimiento en la evolución de sus principales parámetros en el tiempo desde principio de la década del año 2000.

De este sector se tomaron los datos de consumo de agua de las viviendas unifamiliares, que son un total de 46 del total de clientes del sector. La información fue aportada por la Dirección Comercial de la empresa a partir del historial de consumo de los clientes del sector. Después de un procesamiento de datos estadístico que abarcó la información del 2000 hasta el 2020, se seleccionaron 34 clientes que cumplían con estabilidad en las mediciones y con mínimo de roturas de los contadores. A estos 34 clientes se les determinó el consumo promedio mensual durante el periodo de análisis desde el año 2006 al 2020 expresado en litros por persona por mes (lppm) para su contraste con las variables meteorológicas.

Para acceder a las variables climáticas la información fue gestionada por el INSMET en sus registros diarios y se realizó un procesamiento de la información para llevarla a valores mensuales. Se incluyó un grupo de variables de las cuales algunas se mencionaron anteriormente, que intervienen en el comportamiento del consumo doméstico del agua y en el caso de otras, su inclusión es realmente novedosa, por ejemplo variables bioclimáticas como la temperatura efectiva, la temperatura efectiva equivalente y la amplitud térmica. Las variables meteorológicas se expresan en valores mensuales

para su contraste con el consumo residencial mensual y fueron conceptualizadas en Ramos Joseph et al. (2023).

Para procesar la información recolectada se define como variable dependiente el consumo doméstico expresado en (lppm), a partir de los consumos domésticos promedios de los clientes de la muestra en el periodo comprendido desde el 1 de enero del 2006 hasta el 31 de diciembre del 2020. El resto de las variables meteorológicas se definen como variables independientes. Con esto se conforma la vista minable con un total de 180 registros. Es relevante destacar que con este estudio se realiza por vez primera la predicción de consumos de agua domésticos en Aguas de La Habana a partir de la variabilidad climática. Se incluyen, además, las variables bioclimáticas las cuales incorporan el efecto sensorial sobre los seres vivos, lo cual es novedoso. Para este ejercicio de predicción se utiliza un horizonte de predicción de 3, 6, 9 y 12 meses seleccionados de acuerdo a la necesidad de la empresa. Las conclusiones anteriores se resumen como novedosas para el país.

Las variables independientes empleadas fueron precipitación (*Ll*), ocurrencia de lluvia (*OcLl*), intensidad de las precipitaciones (*r24h*), temperatura minima, media y máxima (*Tmín*, *Tmed*, *Tmáx*), humedad relativa mínima, media y máxima (*Hrmin*, *Hrmed*, *Hrmax*), velocidad promedio del viento (*FFmed*), dirección del viento (*DDmáx*, amplitud de la humedad relativa (*ΔHr*), temperatura efectiva (*TE*), temperatura efectiva equivalente (*TEE*), y amplitud térmica (*ΔT*). El significado de cada variable aparece explicado en Ramos Joseph et al. (2023).

En función de todo lo anterior se confecciona una vista minable compuesta por 180 filas y 19 columnas de las que se tienen 16 variables independientes, dentro de las que sobresalen algunas consideradas como bioclimáticas, una variable dependiente y dos variables temporales.

Como analizador y procesador de los datos se seleccionó el software KNIME, el cual es una herramienta utilizada para el procesamiento de variables y lograr obtener el conocimiento oculto que tienen los datos, sobre la base de criterios matemáticos y estadísticos.

Para confirmar la validez de los resultados que se obtengan se trabajara con el r2 ajustado, como métrica fundamental, la misma tiene como característica que se utiliza para comparar modelos con diferentes cantidades de variables predictoras y en función del mayor valor reconocer el mejor de los modelos comparados a partir de tener una menor cantidad de predictores.

En la literatura consultada se detecta que la mayoría de los investigadores que trabajan predicción del consumo urbano utilizan estas métricas independientemente del modelo utilizado ya sea regresión lineal simple, regresión múltiple o redes neuronales.

Las variables predictoras obtenidas se utilizan para obtener el modelo de regresión múltiple con el objetivo de estimar el consumo en lppm. Para lograr esto se definieron varios experimentos que se describen a continuación en varios experimentos

CARACTERÍSTICAS DE LOS TRES EXPERIMENTOS REALIZADOS.

A continuación, se exponen los objetivos y características de tres experimentos realizados para evaluar las relaciones funcionales entre las variables climáticas y bioclimáticas con el consumo de agua en el sector en estudio.

Primer experimento

Su objetivo es el de evaluar la influencia del consumo histórico en la estimación del valor del consumo real. En este experimento se plantea el uso de una serie temporal a partir de varios horizontes de predicción: a corto y mediano (3, 6, 9 y 12 meses).

Este Modelo Base de Serie Temporal se implementó en el software KNIME, buscando las variantes acordes a los 4 horizontes propuestos. La figura 1 muestra los nodos que se utilizan en la conformación del Modelo Base. Como se observa, el primer nodo es donde se carga la vista minable obtenida a partir del proceso anteriormente descrito. El segundo nodo construye la serie temporal a partir de un metanodo de aprendizaje compuesto por una acción de desfasado (lag column) y una de fraccionamiento (partitioning) y el nodo de aprendizaje tal y como se muestra en la figura 2.

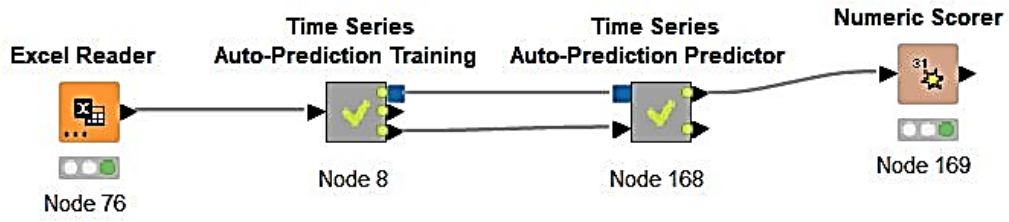

Figura 1 Modelo Base de Serie temporal empleado. Fuente KNIME.

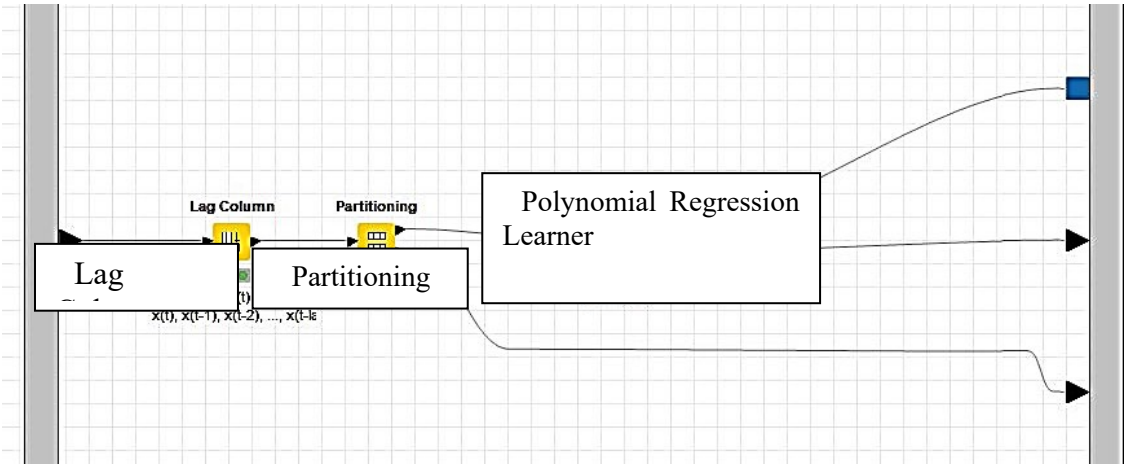

Figura 2. Metanodo de aprendizaje. Fuente KNIME

El Modelo Base de la figura 1 se aplica para cada uno de los horizontes de predicción seleccionados.

Segundo experimento

El objetivo de este experimento es eliminar aquellas variables que no tienen un impacto directo en el nivel sensorial explicado por las variables bioclimáticas. En este caso de las 2 variables temporales incluidas se decide excluir el año.

A continuación, se repite la metodología desarrollada en Ramos et al. (2023) eliminando entre las variables a analizar el año. Esta metodología consiste en utilizar el método de selección de variables, en este caso aplicando el forward o la introducción sucesiva de variables y el backward o la eliminación progresiva de variables. Contrastando ambos métodos se puede determinar las variables que tienen mayor influencia en la estimación del consumo.

Tercer experimento

Analizar diferentes escenarios con presencia de combinaciones de variables climáticas tradicionales y variables bioclimáticas.

El estudio termina con un ejercicio de comparación de las mejores combinaciones de variables predictoras que se obtienen.

03 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados de los tres experimentos definidos en la sección anterior.

El primer experimento se realizó siguiendo la misma estrategia de partición del conjunto de datos descrito en Ramos et al. 2023 y aplicando para los 4 horizontes el Modelo Base Temporal presentado en la figura 1. En cada horizonte se contrastan dos casos el primero relacionando el consumo con todas las variables climáticas y bioclimáticas (16 en total) y en el segundo las variables predictoras seleccionadas en que se reconocerá como la V2023 (Ramos et al., 2023). Los resultados de este experimento se muestran en la figura 3. En este primer resultado se puede comprobar en ambos escenarios sin tener en cuenta el consumo histórico que el valor de la métrica r^2 ajustado es mínimo (0,33) y por lo tanto no permite predecir de forma satisfactoria.

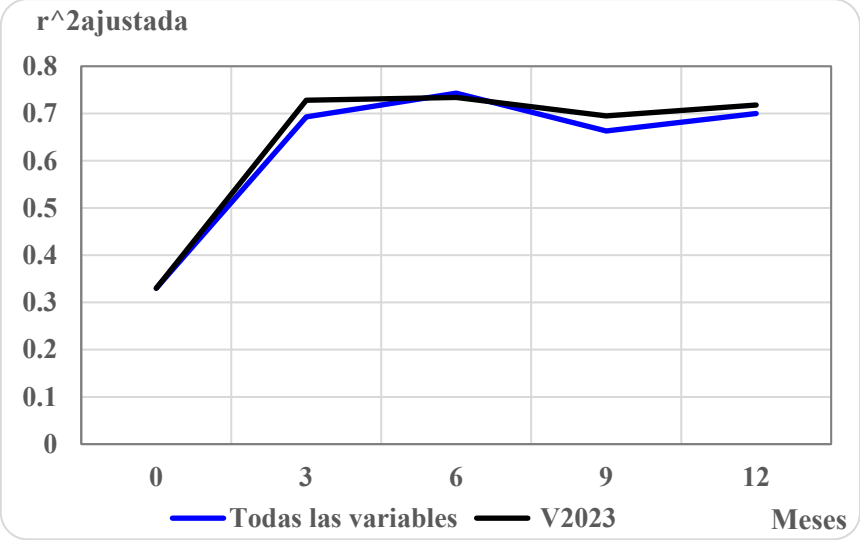

Figura 3. Predicción del consumo en función del r^2 ajustada.

Otro aspecto a destacar del experimento, es que en los dos conjuntos de datos utilizados los valores de r2 ajustada, para los 4 horizontes analizados, mejoran los resultados iniciales que no tenían en cuenta el consumo histórico para realizar la predicción. Se puede apreciar que los mejores resultados se obtienen al tener en cuenta el consumo de los últimos 6 meses. También se puede apreciar que cuando se utilizan variables predictoras (V2023) se pueden obtener resultados similares o mejores a cuando se utiliza todas las variables lo cual implica una notable reducción de tiempo y recursos en la selección y búsqueda de datos para el proceso de predicción.

Con el segundo experimento se evalúa el criterio inicial de los autores, de que las variables que tienen un impacto sensorial pueden ser utilizadas para estimar el consumo de agua. Este experimento se realiza utilizando el mismo conjunto de datos de la V2023, pero en esa ocasión eliminando la variable año, lo llamaremos V2023A a partir de ahora. Los resultados obtenidos se pueden observar en la tabla 1 y se comparan con los obtenidos en el experimento anterior para V2023.

Tabla 1 Efecto de la variable año en la predicción de consumos.

Escenario	Horizonte de predicción (mes)	r^2 ajustada con año	r^2 ajustada sin año
V 2023	3	0,728	0,724
	6	0,734	0,723
	9	0,695	0,701
	12	0,718	0,708

Como se puede observar la presencia del año no marca una diferencia significativa en los resultados de predicción para la métrica utilizada, esto permite afirmar que se pueden realizar ejercicios de predicción del consumo sin incluir el año y obtener resultados satisfactorios. Es relevante comentar que la no utilización del año aumenta el valor de los resultados obtenidos al no estar sujetos a la variable anual, lo cual los hace más universales.

En el tercer experimento, a partir del resumen de los resultados anteriores se decidió repetir el método de selección de variables para un grupo de algoritmos y proceder nuevamente al proceso de conformación de variables predictoras en este caso sin el año.

Los resultados para obtener las variables predictoras en estos nuevos escenarios se muestran en la tabla 2 con la utilización del método de selección de variables Forward. Cada algoritmo presenta entre paréntesis el número de escenarios con un r^2 ajustado mayor igual a 54,7 %.

Tabla 2. Frecuencia de aparición de las variables aplicando el método de selección de variables Forward sin año para diferentes algoritmos.

Variables/Escenarios	Isotonic Regression (9)	Linear Regression (4)	Pace Regression (4)	RBF Regressor (4)	Additive Regression (4)	Total (25)	% Aparición
LPPM	9	4	4	4	4	25	100
Tmín	9	4	4	1	4	22	88
Tmed	9	1	2	4	1	17	68
Tmáx	9	2	4	4	4	23	92
ΔT	9	3	1	4	4	21	84
Hrmín	7	4	4	4	4	23	92
Hrmed	1	1	2	1	4	9	36
Hrmáx	9	4	4	4	1	22	88
ΔHr	4	4	2	3	4	17	68
OcLl	9	4	4	0	3	20	80
TE	2	4	4	4	2	16	64
TEE	6	3	0	0	4	13	52
$r^2$4h	9	4	4	0	1	18	72
Lluvia	9	0	4	2	4	19	76
Ffmed	3	2	2	0	3	10	40
Ffmáx	5	4	4	0	4	17	68
Ddmáx	8	4	3	1	4	20	80

A partir del análisis de la tabla 2 se puede resumir que todas las variables influyen en el consumo doméstico con una frecuencia de aparición que abarca desde 36 % hasta 92 %. Las variables con mayor peso son *Tmáx*, *Tmín*, *Hrmáx*, *Hrmín* y *ΔT*.

Mientras tanto para las variables bioclimáticas la de mayor relevancia es la *ΔT*, seguida por la *ΔHr*, la *TE* y la *TEE* en un rango que abarca desde 52 % hasta 84 % de frecuencia de aparición.

En el mismo ejercicio los resultados de la selección de variables para el backward se aprecian en la tabla 3. En la misma cada algoritmo presenta entre paréntesis el número de escenarios con un r^2 ajustado mayor igual a 50 %.

Tabla 3. Frecuencia de aparición de las variables aplicando el método de selección de variables Backward sin año para diferentes algoritmos.

Variables/ Escenarios	Isotonic Regresión (8)	Linear Regresión (5)	Pace Regresión (6)	RBF Regressor (4)	Ensemble Regresor (5)	M5P (7)	Total (35)	% Aparición
LPPM	8	5	6	4	5	7	35	100,00
T mín	1	0	6	3	5	2	17	48,57
T med	2	1	6	4	2	7	22	62,86
T máx	8	5	6	4	5	7	35	100,00
ΔT	8	4	4	2	1	4	23	65,71
HRmín	6	5	1	4	5	1	22	62,86
HRmed	8	5	2	0	5	7	27	77,14
Hrmáx	4	2	6	4	5	7	28	80,00
ΔHr	8	5	0	2	4	7	26	74,29
OcLl	8	5	5	4	5	7	34	97,14
TE	5	5	3	4	5	7	29	82,86
TEE	7	3	6	1	3	7	27	77,14
$r^2$4h	8	5	6	4	5	5	33	94,29
Lluvia	8	1	6	1	3	7	26	74,29
FFmed	8	3	6	4	3	7	31	88,57
FFmáx	8	5	6	0	5	6	30	85,71
DDmáx	8	5	6	1	5	4	29	82,86

Como se puede apreciar en la tabla 3, todas las variables influyen en el consumo con una frecuencia de aparición que abarca desde 48,57 % hasta 100 %. Las variables de mayor peso son *Tmáx*, *OcLl*, y la *$r^2$4h*.

En tanto para las variables bioclimáticas el análisis muestra que la de mayor frecuencia de aparición es la *TE*, seguida por la *TEE*, la *ΔHr* y la *ΔT*, en valores que van desde 65,71 % hasta 82,86 %.

El análisis en conjunto de las tablas 2 y 3 permite reconocer que en ambos métodos las variables a tener en cuenta para confeccionar un modelo de predicción por su mayor frecuencia de aparición son la *Tmáx*, *Hrmín*, *OcLl*, *Tmín*, *$r^2$4h*, *Hrmáx*, *FFmáx*, *ΔT* y *FFmed*. Estas 9 variables conformarían el modelo resultante de variables predictoras, es interesante apreciar dentro del mismo la *ΔT* que es la

única variable bioclimática incluida entre las de mayor frecuencia de aparición. Se aprecia también la presencia de la *FFmáx* que sin ser bioclimática es una variable que implica un efecto sensorial.

A partir de las tablas 2 y 3 si se realiza el análisis integral de las variables bioclimáticas, las que se deben tener en cuenta para confeccionar un modelo de predicción son la *ΔT* seguida de *TE*, *ΔHr* y finalmente la *TEE*. En ese orden se pueden combinar con otras variables predictoras y también se pueden utilizar como un bloque único lo cual es un enfoque totalmente novedoso.

Teniendo en cuenta las variables predictoras obtenidas, se realizan varias combinaciones que aportan los siguientes escenarios tal y como se observa en la tabla 4.

Tabla 4. Combinaciones de predicción obtenidas

Escenario	Variables incluidas
V2023A	*$r^2$4h, FFmáx, AT, Hrmáx, Hrmín*
VA1	*ΔT, ΔH, TEE, $r^2$4h*
VA3	*OcLl, TE, ΔT, DDmáx, Hrmáx*
VA4	*Tmáx, Hrmín, ΔT, Ocll, Hrmáx*
VA5	*ΔT, ΔH, TE, Ocl, $r^2$4h*
VB1	*Tmáx, Hrmín, OcLl, Tmín, Hrmáx, $r^2$4h, ΔT, FFmáx, FFmed*
VB2	*ΔT, ΔHr, TE*

Una vez conformados los escenarios compuestos por las variables, tal y como se muestra en la tabla anterior, se procede a realizar el modelo de predicción para cada combinación propuesta anteriormente. Se utilizarán horizontes que incluyen los 12 meses de predicción en cada variante. La métrica de seguimiento y valoración de los resultados es el r^2 ajustada. Los resultados se pueden apreciar en la figura 5.

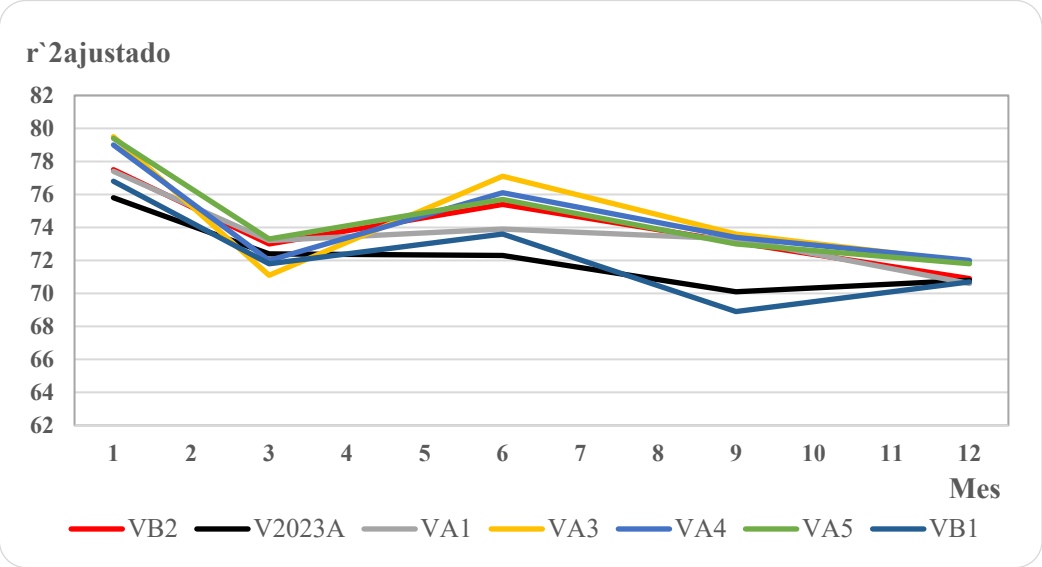

Figura 5. Comportamiento del r^2ajustado para cada variante

De los resultados de la figura 5 se puede comentar lo siguiente, todas las variantes transitan en valores de un r2 ajustada que van desde 68,9 % hasta 79,5 %. Para horizontes de 6 meses y 1 mes en prácticamente todas las variantes se obtienen mejores niveles de predicción. Se demuestra de forma práctica que la utilización de un modelo de predicción sin incluir el año permite obtener resultados satisfactorios en la predicción del consumo doméstico.

Es relevante reconocer que las variantes *VA1* y *VA5* conformadas por más de una variable bioclimática en conjunto con variables tradicionales, presentan altos valores de ajuste lo que permite fundamentar la necesidad de la inclusión de este tipo de variables en los modelos de predicción para mejorar los niveles de ajuste y comprensión del consumo doméstico.

Sobresale entre los resultados de la figura 5 la variante *VB2*, la misma compuesta únicamente por 3 variables bioclimáticas presenta valores de ajustes similares al resto de las variantes, que están conformadas total o parciamente por variables tradicionales. Los valores de ajuste permiten concluir que la sensación térmica tiene un impacto directo en el consumo doméstico de agua. Este resultado significa que solo con las variables bioclimáticas se puede explicar el comportamiento del consumo a partir de la variabilidad climática de forma satisfactoria, siendo este un resultado del cual no se ha encontrado similar en la bibliografía consultada por lo que es un resultado novedoso.

A partir de lo que se muestra en la figura 5 y para lograr un mejor entendimiento de lo que implica la utilización de las variables bioclimáticas se decidió incluir en la variante VB2 el escenario de análisis de la ecuación de regresión polinomial de primer orden para un horizonte de predicción de 6 meses el cual se muestra a continuación:

$$Lppm=-a*MES+b*AT-c*AmpHumedad+d*TE+e*LPPM(-1)+f*LPPM(-2)-g*LPPM(-3) -h*LPPM(-4)+i*LPPM(-5)-j*LPPM(-6) \quad (1)$$

Para esta ecuación se presentan en la tabla 5 los coeficientes asociados a cada variable.

Tabla 5. Coeficientes de la ecuación de regresión

Coeficientes de la Ecuación	Coeficientes de la Ecuación	Coeficientes de la Ecuación
a= 54,221	*e*= 0,8581	*i*= 0,2912
b= 34,2303	*f*= 0,1445	*j*= 0,0909
c= 27,7235	*g*= 0,0178	
d= 1,1722	*h*= 0,3236	

De la ecuación de regresión (1) se puede concluir que todas las variables tienen una relación directa con el consumo, de acuerdo a los coeficientes, la que más peso tiene para el consumo es la *ΔT* seguida por la *ΔHr* con signo contrario, ambas son significativas en este esquema, terminando con la TE. De esta ecuación se puede interpretar que los cambios bruscos de temperatura y humedad relativa inciden de forma directa en la demanda

04 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados de la investigación permiten afirmar que las variables bioclimáticas tienen una gran influencia en el consumo, proponiéndose un modelo de predicción de la demanda utilizando tan solo variables bioclimáticas que explican el 73 % del comportamiento del consumo, novedoso aporte, sin precedentes en las investigaciones consultadas en el estado del arte que sirvieron de base a la conformación del marco teórico.

Igualmente, los resultados obtenidos demuestran que la sensación térmica tiene un efecto directo en la predicción de la demanda doméstica de agua, con modelos con buen ajuste de r2 ajustado como se demuestra en los escenarios que combinan bioclimáticas con otras variables tradicionales tales como el *VA1*, *VA3*, *VA4* y *VA5* respectivamente, pudiéndose realizar modelos satisfactorios de predicción de la demanda sin incluir el año como variable.

Por último, se pudo comprobar que la utilización de los valores históricos de consumo en el modelo de predicción, permite obtener escenarios con mejores ajustes del mismo.

RECONOCIMIENTO

La investigación que da origen a los resultados presentados en esta contribución recibió fondos del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) de la República de Cuba.

Se agradece al destacado meteorólogo Carlos M González Ramírez, fallecido sin cuyo apoyo y experticia no hubiera sido posible obtener estos resultados.

05 REFERENCIAS

Alshaikhli M., Aqeel S., Valdeolmillos N., Fathima F. and Choe P. (2021). "A Multi-Linear Regression Model to Predict the Factors Affecting Water Consumption in Qatar." IOP Conf. Series Earth Environ. Sci 691 012004. Doi 10.1088/1755-1315/691/1/012004.

Arellano A. y Peña D. (2020). "Modelos de regresión lineal para predecir el consumo de agua potable". NOVASINERGIA, ISSN 2631-2654, 3(1), 27-36. https://doi.org/10.37135/ns.01.05.03.

De Souza G., Azevedo G., Marcelo C. and Marcelo L. (2019) "Predicting water demand: a review of the methods employed and future possibilities". IWA Publishing Water Supply | 19.8.

Hao W., Cominola A., Castelletti A. (2022). "Comparing predictive machine learning Models for Short- and Long-Term Urban Water Demand Forecasting in Milan, Italy." IFAC On Line: 55-33 (2022) 92-98.

Pomares J. (2022) "Principales factores climáticos que afectan la demanda doméstica". Tesis de diploma, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana. Cuba.

Ramos J.M., León A.J., Socorro R., Carvajal R. and González C. M. (2023) "Climatic factors that impact the consumption patterns tame of water. A case of study". Progress in Artificial Intelligence and Pattern Recognition. 8th International Congress on Artificial Intelligence and Pattern Recognition, pages 35-47. IWAIPR 2023, Varadero, Cuba, September 27–29, 2023, Proceedings. https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-49552-6-4

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Mario Ramos Joseph https://orcid.org/0000-0002-2784-206X
Realizó contribuciones en conceptualización, metodología, validación, análisis formal, escritura y discusión de los resultados

Reniel Carvajal Alfonso https://orcid.org/0000-0002-8656-4709
Realizó contribuciones en software, validación, investigación y discusión de los resultados

Raisa Socorro Llanes https://orcid.org/0000-0002-5072-6438
Realizó contribuciones en el diseño de la investigación, corrección del documento y análisis y discusión de los resultados.

Alcides J. León Méndez https://orcid.org/0000-0002-5072-6438
Realizó contribuciones en el diseño de la investigación, corrección del documento y análisis y discusión de los resultados.

Modelo en MatLab de centrales maremotérmicas de ciclo de Anderson. Primera aproximación

Henry Bory Prevez E-MAIL: bory@uo.edu.cu
Facultad de Ingeniería Química y Agronomía. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba. Cuba.
Angel Orlando Castellano Sanchez E-MAIL: angel.castellano@uo.edu.cu
Facultad de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba.

RESUMEN

Una central maremotérmica es un sistema capaz de aprovechar los gradientes térmicos oceánicos para producir electricidad. Se trata de una máquina térmica en la que el agua superficial actúa como fuente de calor, mientras que el agua extraída de las profundidades actúa como refrigerante. El objetivo es modelar matemáticamente las centrales maremotérmicas de ciclo abierto o de Anderson emplazadas en la costa y conectadas al sistema eléctrico. Para esto se revisó la bibliografía relacionada con los componentes de esta central, se modeló matemáticamente cada componente, a partir del diagrama funcional propuesto por los autores de este trabajo, se obtuvo el modelo de dichas centrales en MatLab/Simulink, lo que permitió determinar para un escenario dado la potencia producida por el generador y la entrega de energía eléctrica al sistema eléctrico.

KEYWORDS: ciclo de Anderson, energía maremotérmica, modelo matemático

MatLab model of tidal thermal power plants based on Anderson cycle. First approach

ABSTRACT

A tidal thermal power plant is a system capable of using of ocean thermal gradients to produce electricity. It is a thermal machine in which surface water acts as a heat source, while water extracted from the depths acts as a coolant. The aim is to mathematically model the open cycle or Anderson tidal thermal power plants located on the coast and connected to the electrical system. For that, the bibliography related to the elements that make up this plant was reviewed, each component was mathematically modeled, from the functional diagram proposed by the authors, the model of these plants was obtained in MatLab/Simulink, which allowed to determine for a given scenario the power produced by the generator and the delivery of electrical energy to the electrical system.

PALABRAS CLAVES: Anderson cycle, tidal thermal energy, mathematical model

CITMA CERTIFICADO
Marzo 2024-RECIBIDO APROBADO-Abril 2024
Esta obra está bajo una licencia internacional creative commons attribution-noncommercial 4.0
SciELO

01 INTRODUCCION

La Conversión de Energía Térmica Oceánica, OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion, del inglés), o energía maremotérmica es una fuente renovable de energía basada en el cambio de la temperatura del mar respecto a la profundidad, este gradiente de temperatura se puede utilizar para impulsar una máquina térmica que genera trabajo útil que se convierte en electricidad. Los océanos captan el calor generado por la radiación solar por lo cual los sistemas OTEC son una fuente de energía casi ilimitada dependiente del sol. (Heredia et al. 2023).

El escritor francés Julio Verne, en su obra *Veinte mil leguas de viaje submarino*, publicada en 1869, fue la primera persona en hacer referencia a la obtención de energía eléctrica a partir del gradiente de temperatura de los océanos. En el año 1881 el físico francés Jacques Arsene d'Arsonval propuso esta tecnología. (Heredia et al. 2023) El 22 de noviembre de 1926 el ingeniero francés Georges Claude presentó a la Academia de Ciencias de París un modelo, a escala, que demostraba la posibilidad de aprovechar la energía maremotérmica. Este científico en el año 1930 construyó en Cuba, al norte de Matanzas, la primera central maremotérmica del mundo como se muestra en la figura 1, que funcionó 11 días, pues fue destruida por una tempestad, luego construyó otra en aguas de Río de Janeiro (1934-1935). Aunque estas centrales demostraron la viabilidad del proyecto de Claude, acabaron en fracaso a causa de los efectos del movimiento del oleaje sobre la conducción sumergida (Abreu 2021) y (Heredia et al. 2023)

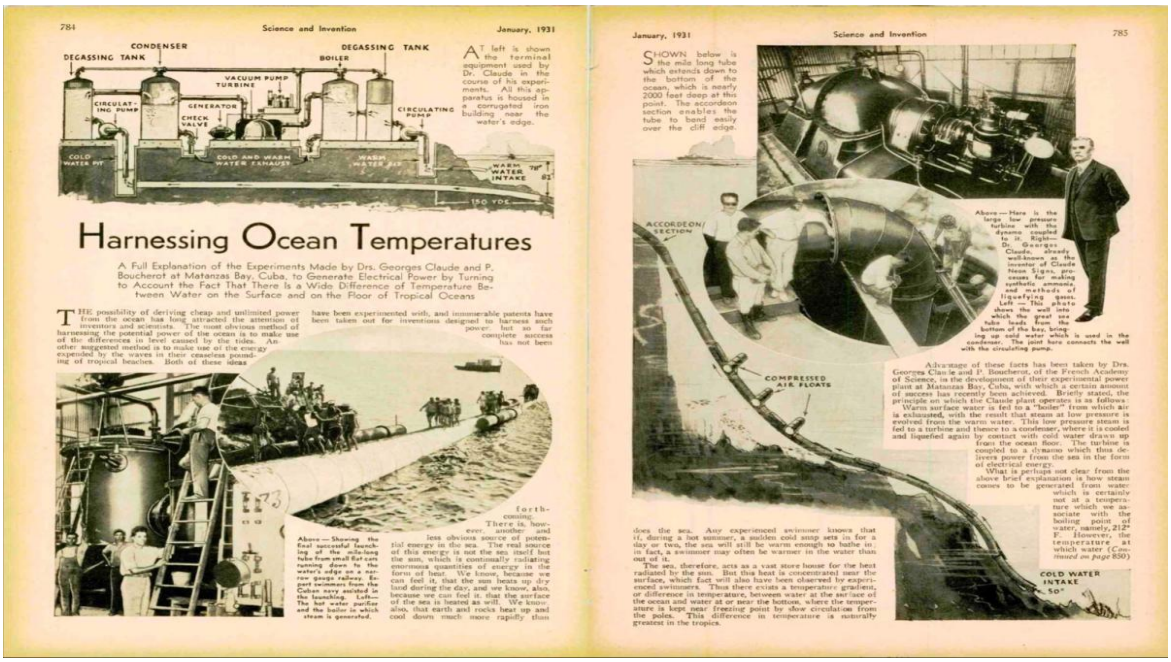

Figura 5. Primera planta piloto del mundo para la explotación de la energía maremotérmica en Cuba. **(Diario de la época, Matanzas, 1930)**

En la última década se han realizados varios proyectos de plantas OTEC como los proyectos propuestos por la empresa estadounidense Ocean Thermal Energy Corporation, para construir dos plantas OTEC de 5 y 10 MW en las Islas Marshall, y en la base naval de Diego García en el Océano Índico construir una planta OTEC de 13 MW para sustituir los actuales generadores diésel. De igual modo en las Bahamas se han proyectado dos plantas maremotérmicas de 5 y 10 MW que serían explotadas en modo de concesión por la compañía americana Ocean Thermal Energy Corporation. Actualmente se encuentra en operación la planta OTEC más grande del mundo situada en la costa de Kona, en Hawái, Estados Unidos, las aguas tropicales de la región presentan grandes diferencias de

temperatura, existen profundidades notables en zonas cercanas a la costa donde la temperatura puede bajar hasta los 5 °C en el fondo del mar. (Heredia et al. 2023).

De las cinco formas de obtener energía de los mares, solo es posible la explotación de tres de ellas en los mares aledaños a Cuba, estas son: energía de las corrientes de marea, energía de las olas (Undimotriz) y el gradiente de energía térmica del océano, según (Lorenzo et al. 2023) y (Castellano et al. 2022). El objetivo de este trabajo es modelar matemáticamente centrales maremotérmicas de ciclo abierto o de Anderson emplazadas en la costa y conectadas al sistema eléctrico en MatLab/Simulink®. Luego, se emplea el modelo para determinar, en un escenario, la potencia producida por el generador y la entregada al sistema eléctrico. Los autores usan el esquema de Anderson por ser el adecuado para Cuba según la comparación de OTECs reportada en (Heredia et al. 2023).

02 FUNCIONAMIENTO DEL ESQUEMA DEL SISTEMA DE CICLO ABIERTO O CICLO DE ANDERSON

El diagrama funcional de centrales maremotérmicas de ciclo abierto o de Anderson conectadas al sistema eléctrico y emplazadas en costa, obtenido por los autores, se muestra en la figura 2. En este se observa que la bomba de agua caliente impulsa el fluido, agua caliente del mar, hacia el evaporador flash que convierte parte del agua en vapor y el agua líquida la devuelve al mar; el vapor de agua cede energía a la turbina y esta constituye la fuente motriz del generador eléctrico que aporta energía a la red eléctrica; luego que el vapor realiza trabajo en la turbina fluye al condensador intercambiando calor con el agua fría de mar bombeada por la bomba de agua fría y al condensarse esta puede emplearse para el riego y otras actividades. Ishaq y Dincer (2020) y (Heredia et al. 2023).

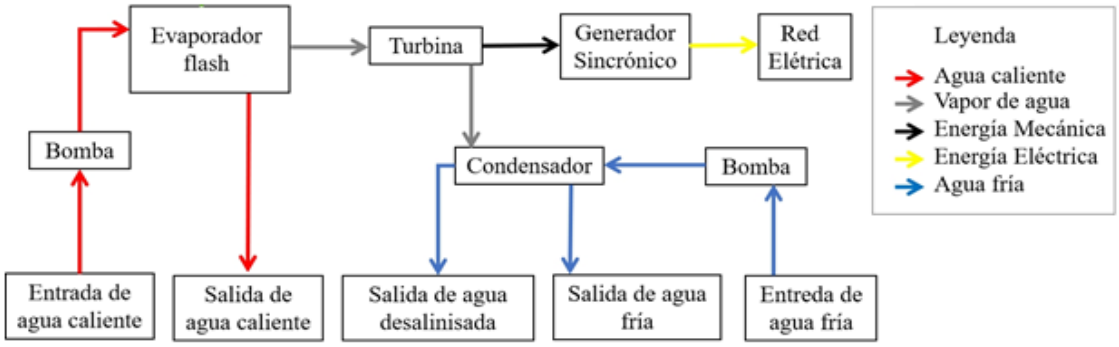

Figura 6. Diagrama funcional.

MODELADO DE CENTRALES MAREMOTÉRMICAS DE ANDERSON CONECTADAS A LA RED ELÉCTRICA Y EMPLAZADA EN TIERRA O EN COSTA.

La modelación matemática de plantas maremotérmicas de ciclo abierto o de Anderson conectadas al Sistema Electroenergético Nacional (SEN) y emplazadas en tierra, parte de aplicar las leyes de Newton a la dinámica rotacional y la Termodinámica. Los componentes principales del diagrama funcional mostrado en la figura 2 son: las bombas de agua caliente y fría de mar, el evaporador flash, la turbina y el generador eléctrico conectado al SEN.

Bomba de agua caliente de mar:

El modelo matemático para la bomba de agua caliente de mar está basado en el reportado en (Gil 2017), donde los autores despejaron el flujo másico de agua caliente en función de la potencia

suministrada a la bomba. Esto se corresponde con el proceso real, se suministra potencia a la bomba para lograr un flujo másico.

$$G_{ac} = \frac{N_{bc} \cdot P_{ebc}}{g \cdot (\Delta h_{Bcf} + \Delta h_{Bcb} + \Delta h_{Bce} + \Delta h_{Bcotras})} \qquad (1)$$

Donde: G_{ac} flujo másico de agua caliente de mar en kg/s; N_{bc} eficiencia de la bomba de agua caliente, adimensional; P_{ebc} potencia eléctrica de la bomba de agua caliente en W; g aceleración de la gravedad en m/s^2; Δh_{Bcf} pérdida de carga debida a los tramos rectos de tubería en m; Δh_{Bcb} pérdida de carga debida a la curvatura de la tubería en m; Δh_{Bce} pérdida de carga en el evaporador en m; y $\Delta h_{Bcotras}$ representa otras pérdidas en m, esta variable fue adicionada por los autores para permitir a un investigador incorporar otras pérdidas posibles de una planta específica que no esté contemplada en la ecuación dada en (Gil 2017). A modo de ejemplo, se tiene para la bomba SNZ/SEZ una eficiencia de 0,80 según (Gil 2017). En la figura 3 a) se muestra el bloque en MatLab/Simulink® donde se implementó la ecuación (1) y la figura 3 b) muestra la interfaz de diálogo creada para dicho bloque.

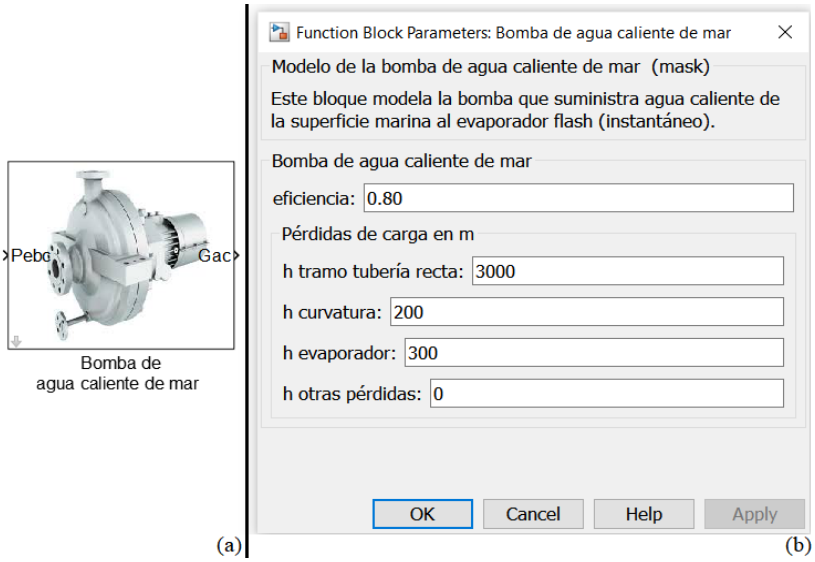

Figura 7. (a) Bloque que modela la bomba de agua caliente de mar, (b) ventana de entrada de parámetros. **(Fuente: el autor)**

Bomba de agua fría de mar

De modo semejante, al modelo de la bomba de agua caliente, se operó con el modelo matemático para la bomba de agua fría de mar en la expresión reportada en (Gil 2017).

$$G_{af} = \frac{N_{bf} \cdot P_{ebf}}{g \cdot (\Delta h_{Bff} + \Delta h_{Bfb} + \Delta h_{Bfc} + \Delta h_{Bfotras})} \qquad (2)$$

Donde: G_{af} flujo másico de agua fría de mar en kg/s; N_{bf} eficiencia de la bomba de agua fría, adimensional; P_{ebf} potencia eléctrica de la bomba de agua fría, en W; g aceleración de la gravedad en m/s^2; Δh_{Bff} pérdida de carga debida a los tramos rectos de tubería de agua fría en m; Δh_{Bfb} pérdida de carga debida a la curvatura de la tubería de agua fría en m; Δh_{Bfc} pérdida de carga en el condensador en m; y $\Delta h_{Bfotras}$ representa otras pérdidas en m, de modo similar al caso de la bomba de agua caliente, los autores adicionaron la variable $\Delta h_{Bfotras}$ para permitir a un investigador incorporar otras pérdidas. Según se reporta en (Gil 2017) una bomba para el agua fría de mar tiene

una eficiencia de 0,75. En la figura 4 a) se muestra el bloque en MatLab/Simulink® donde se implementó la ecuación (2) y la figura 4 b) muestra la interfaz de diálogo creada para dicho bloque.

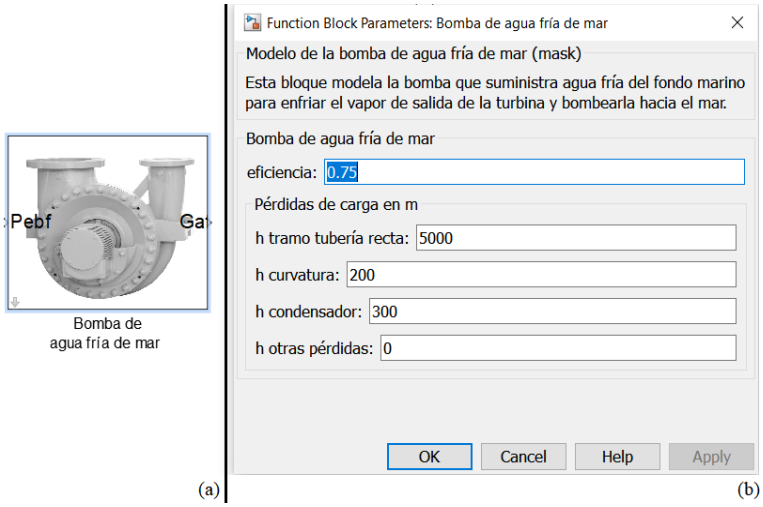

Figura 8. (a) Bloque que modela la bomba de agua fría de mar, (b) ventana de entrada de parámetros. **(Fuente: el autor)**

Evaporador flash

Es el equipo en el cual ocurre la evaporación casi instantánea de un líquido por disminución brusca de la presión según Green and Southard (2019). Este dispositivo evapora parte del agua caliente de mar en la cámara de evaporación y tiene como residuo la parte no evaporada con mayor concentración de sales denominada salmuera útil para la acuicultura según (Vera et al. 2020). El parámetro de operación del evaporador flash es la presión en la cámara de vacío, la que es inferior a la presión atmosférica. Para determinar la expresión matemática que relaciona los flujos másicos del agua caliente a la entrada del evaporador y los del vapor y de salmuera a la salida de este, se aplica un balance de masa según Green and Southard (2019), del cual se obtiene la ecuación (3).

$$G_{ac} = G_{va} + G_{liq} \qquad (3)$$

Donde: G_{ac} flujo másico de agua caliente de mar a la entrada del evaporador en kg/s, G_{va} flujo másico de vapor de agua a la salida del evaporador en kg/s, G_{liq} flujo másico de salmuera a la salida del evaporador en kg/s. Es válido mencionar que G_{ac} es suministrado al evaporador flash por la bomba de agua caliente. En (Green and Southard, 2019) se determina la fracción de vapor, denominada título, que se obtiene al disminuir bruscamente la presión a la masa de agua caliente mediante la expresión siguiente:

$$x = m_{va}/m_{ac} \qquad (4)$$

donde: x es el título, adimensional; m_{va} masa de vapor a la salida del evaporador en kg, m_{ac} masa de agua caliente de mar a la entrada del evaporador en kg/s. De (Green and Southard ,2019) se conoce que $G_{va} = dm_{va}/dt$ y $G_{ac} = dm_{ac}/dt$, luego junto a las ecuaciones (3) y (4) se determinan los flujos másicos a la salida del evaporador en función del título y del flujo másico a la entrada del evaporador como muestran las siguientes ecuaciones:

$$G_{va} = xG_{ac} \qquad (5)$$

$$G_{liq} = (1 - x)G_{ac} \qquad (6)$$

El cálculo de x, según Green and Southard (2019), se realiza mediante la siguiente expresión:

$$x = \frac{v_{ac} - v_{liq}}{v_{va} - v_{liq}} \qquad (7)$$

donde: v_{ac} volumen específico del agua caliente de mar a la entrada del evaporador en m^3/kg; v_{va} volumen específico del vapor a la salida del evaporador en m^3/kg; v_{liq} volumen específico del agua líquida o salmuera a la salida del evaporador en m^3/kg. Los volúmenes v_{va} y v_{liq} son funciones de la presión en la cámara de vacío.

En la figura 5 a) se muestra el bloque en MatLab/Simulink® donde se implementaron las ecuaciones (5), (6) y (7) y la figura 5 b) muestra la interfaz de diálogo creada para dicho bloque.

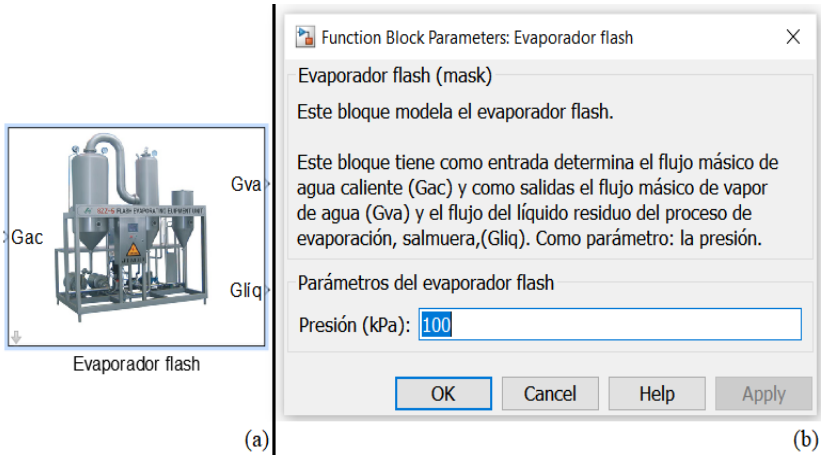

Figura 9. (a) Bloque que modela el evaporador flash, (b) ventana de entrada del parámetro presión.
(Fuente: el autor)

Turbina

La turbina de vapor funciona con la energía que posee el fluido de trabajo, energía que es cedida a los álabes de la turbina y transmitida por su eje. De esta forma la turbina obtiene la energía mecánica para mover el rotor de un generador eléctrico y que este produzca energía eléctrica. La potencia de la turbina se calcula según (Gil 2017) con la siguiente ecuación:

$$P_m = G_{va}(h_1 - h_2)N_T \qquad (8)$$

donde: P_m potencia motriz desarrollada por la turbina en W; G_{va} flujo másico de vapor de agua en kg/s; h_1 entalpía del vapor de agua a la entrada de la turbina en J/kg; h_2 entalpía del vapor de agua a la salida de la turbina en J/kg; N_T eficiencia de la turbina, adimensional. En la figura 6 a) se muestra el bloque en MatLab/Simulink® donde se implementó la ecuación (8) y la figura 6 b) muestra la interfaz de diálogo creada para dicho bloque.

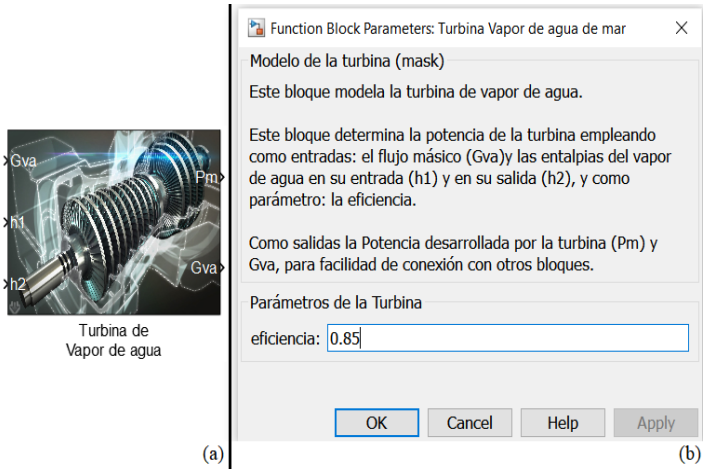

Figura 10. (a) Bloque que modela la turbina, (b) ventana de entrada del parámetro eficiencia de la turbina. **(Fuente: el autor)**

Condensador

Un condensador, en termodinámica, es un equipo intercambiador de calor, que pretende que el fluido gaseoso, fluido caliente, que lo recorre cambie a fase líquida mediante el intercambio de calor, con otro medio, fluido enfriador (Cortés 2020). La expresión matemática que modela al condensador es dada en (Gil 2017) y se muestra en la ecuación (9).

$$h_3 = h_2 - \frac{G_{af}}{G_{av}} C_p (T_{iAF} - T_{oAF}) \quad (9)$$

Donde: h_3 entalpía del agua caliente a la salida del condensador en J/kg, h_2 entalpía del vapor de agua a la entrada del condensador en J/kg, G_{av} flujo másico del vapor de agua en kg/s, G_{af} flujo másico de agua fría de mar en kg/s, C_p capacidad calorífica específica del agua de mar en J/kg°C, T_{iAF} temperatura del agua de mar a la entrada del condensador en °C, T_{oAF} temperatura del agua de mar a la salida del condensador en °C. Se remarca que se empleó el símbolo h_2 para la entalpía del vapor de agua tanto a la entrada del condensador como a la salida de la turbina, debido a que el vapor que sale de la turbina es el mismo que entra al condensador, como se aprecia en el diagrama funcional mostrado en la figura 2.

En la figura 7 a) se muestra el bloque en MatLab/Simulink® donde se implementó la ecuación (9) y la figura 7 b) muestra la interfaz de diálogo creada para dicho bloque.

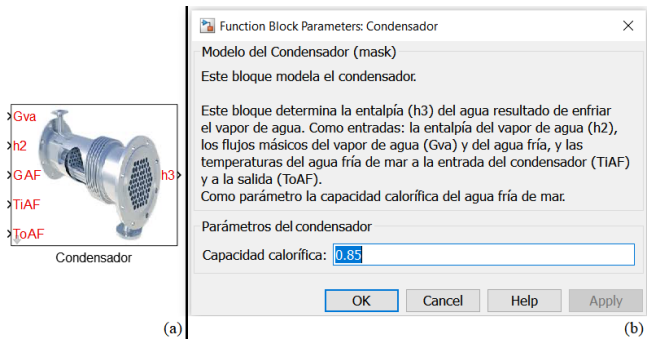

Figura 11. (a) Bloque que modela el condensador, (b) ventana de entrada del parámetro capacidad calorífica. **(Fuente: el autor)**

Generador Síncrono

Un generador síncrono es una máquina eléctrica rotatoria que convierte la energía mecánica en energía eléctrica. Éste se compone de: rotor o excitación y estator o armadura. El rotor es la parte móvil del generador, mientras que el estator es la parte fija según (Fitzgerald 1996). La razón por la que se llama generador síncrono es la igualdad entre la velocidad del campo sincrónico y la velocidad angular del rotor, es decir, el rotor girará a la velocidad del campo magnético sincrónico, en estado estacionario, lo cual se denomina sincronismo (Fitzgerald 1996). El generador eléctrico se supone que está conectado al SEN, el cual se considera un bus de potencia infinita, según criterio dado en (Fitzgerald 1996). Aplicando la segunda Ley de Newton al movimiento rotacional, según (Fitzgerald 1996), se tiene:

$$J_T \frac{dw_{rm}}{dt} = T_{\mathrm{m}} - T_e - T_F \qquad (10)$$

donde: J_T momento de inercia total del grupo turbina-generador eléctrico en kgm^2, w_{rm} velocidad angular del rotor del generador en rad/s, T_m torque motriz desarrollado por la turbina en Nm, T_e torque electromagnético del generador eléctrico en Nm, T_F torque de amortiguamiento en Nm.

Para relacionar los torques con las potencias se multiplica la ecuación (10) por la velocidad sincrónica del rotor, w_{rm0}, bajo el supuesto de pequeñas desviaciones de w_{rm} alrededor de w_{rm0}. De lo anterior se obtiene:

$$J_T w_{rm0} \frac{dw_{rm}}{dt} = T_m w_{rm0} - T_e w_{rm0} - T_F w_{rm0} \qquad (11)$$

Al aplicar las expresiones siguientes: $P_m = T_m w_{rm0}$ y $P_e = T_e w_{rm0}$, se obtiene la ecuación (12).

$$J_T w_{rm0} \frac{dw_{rm}}{dt} = P_m - P_e - T_F w_{rm0} \qquad (12)$$

De (Fitzgerald 1996) se conoce que la velocidad instantánea del rotor en rad geométricos por segundo, w_{rm}, se relaciona con la velocidad instantánea del rotor en rad eléctricos por segundo, w_r, y el número de pares de polos del generador, p, mediante la ecuación (13).

$$w_{rm} = \frac{1}{p} w_r \qquad (13)$$

Sustituyendo en la ecuación (12) la ecuación (13), se obtiene la ecuación (14)

$$J_T \frac{w_{rm0}}{p} \frac{dw_r}{dt} = P_m - P_e - T_F w_{rm0} \qquad (14)$$

En (Fitzgerald 1996) se define el ángulo de potencia δ en rad eléctricos, como la diferencia de la posición angular de los ejes de los campos magnéticos de excitación, θ_r, y de armadura, θ_{r0}, en radianes eléctricos, o sea, $\delta = \theta_r - \theta_{r0}$. Para relacionar δ con la derivada temporal de w_r, se deriva la expresión $\delta = \theta_r - \theta_{r0}$, se recuerda que $w_r = d\theta_r / dt$ y se define $w_{r0} = d\theta_{r0} / dt$, velocidad del campo sincrónico en rad eléctricos por segundo, resultando la ecuación (15).

$$\frac{d}{dt}\delta = w_r - w_{r0} \qquad (15)$$

La interpretación de la ecuación (15), es que la rapidez de cambio de δ es igual a la diferencia de las velocidades angulares instantáneas del rotor y del campo sincrónico, lo cual explica el cambio de posición relativa entre los campos magnéticos de excitación y de armadura. La velocidad del campo de armadura está fijada por la frecuencia de la red eléctrica, para Cuba es 60 Hz. Al despejar w_r en la ecuación (15) y al sustituir en la ecuación (14) se tiene:

$$J_T \frac{w_{rm0}}{p}\frac{d^2}{dt^2}\delta = P_m - P_e - T_F w_{rm0} \qquad (16)$$

El torque T_F, se relaciona con w_r y w_{r0} a través del coeficiente de fricción debido al amortiguamiento, k_F, medido en Nms/rad, (Fitzgerald 1996), como:

$$T_F = k_F \frac{w_r - w_{r0}}{p} \qquad (17)$$

Luego, sustituyendo la ecuación (15) en la ecuación (17) se obtiene la ecuación (18).

$$T_F = \frac{k_F}{p}\frac{d\delta}{dt} \qquad (18)$$

Al sustituir la ecuación (18) en la ecuación (16) se obtiene la ecuación (19).

$$J_T \frac{w_{rm0}}{p}\frac{d^2}{dt^2}\delta = P_m - P_e - \frac{k_F}{p} w_{rm0}\frac{d\delta}{dt} \qquad (19)$$

Como primera aproximación en este trabajo se emplea para el cálculo de la potencia electromagnética la expresión dada en (Fitzgerald 1996), que se muestra a continuación:

$$P_e = \frac{E_l V_l}{X_S} sen(\delta) \qquad (20)$$

Donde: P_e potencia electromagnética en W, E_l valor eficaz de la tensión de línea detrás de la reactancia sincrónica en V, V_l tensión eficaz de línea de la alimentación en V, X_s reactancia sincrónica en Ω, δ ángulo de potencia en rad eléctricos.

Al sustituir la ecuación (20) en la ecuación (19) y agrupando los términos que contienen al ángulo de potencia en el miembro izquierdo, se obtiene la expresión siguiente:

$$J_T \frac{w_{rm0}}{p}\frac{d^2}{dt^2}\delta + \frac{k_F w_{rm0}}{p}\frac{d}{dt}\delta + \frac{E_l V_l}{X_S} sen(\delta) = P_m \qquad (21)$$

La ecuación (21) es el modelo del generador eléctrico. Esta presenta la ventaja que además de determinar la potencia eléctrica que el generador produce, obtiene el ángulo de potencia, el cual brinda información acerca de la estabilidad del generador eléctrico. En la figura 8 a) se muestra el bloque en MatLab/Simulink® donde se implementó la ecuación (21) y la figura 8 b) muestra la interfaz de diálogo creada para dicho bloque.

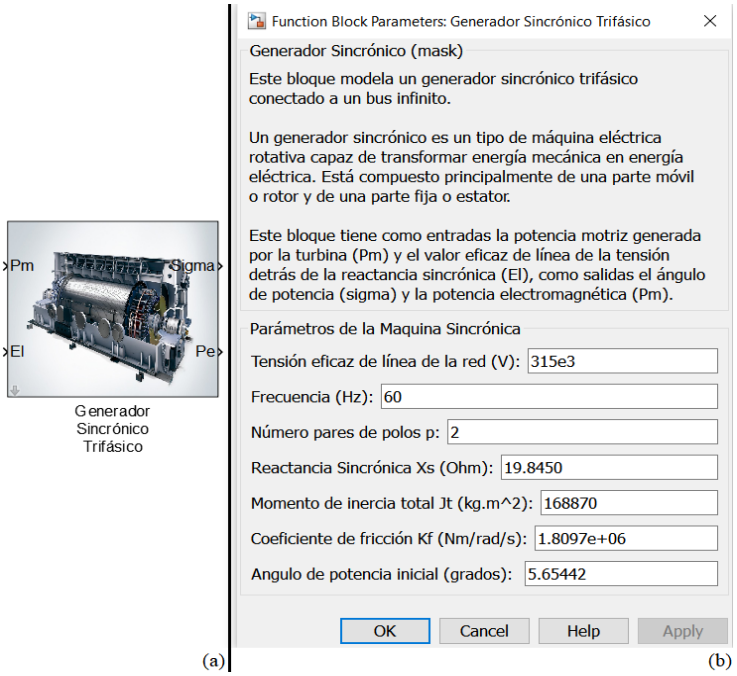

Figura 12. (a) Bloque que modela el generador sincrónico, (b) ventana de entrada de parámetros. **(Fuente: el autor)**

03 DESCRIPCIÓN DEL MODELO EN MATLAB/SIMULINK

En la figura 9 se muestra el modelo en MatLab/Simulink® de centrales maremotérmicas de ciclo abierto o de Anderson, conectadas al SEN. Este modelo se ha obtenido mediante la interconexión de los modelos de cada componente según el diagrama funcional de la figura 2.

Como se observa, el modelo de la figura 9 contiene los modelos de cada componente, obtenidos en las subsecciones anteriores. Además, este incluye los bloques visualizadores para graficar señales, las diferentes variables de entrada y salidas cuyos valores brindan información de operación; bloques de entrada de valores, estos facilitan a un investigador implementar varios escenarios; y un bloque sumador para determinar la potencia que la central aporta al SEN, que es menor que la potencia entregada por el generador debido a que el funcionamiento de la planta impone consumir potencia para la alimentación de las bombas de agua fría y caliente.

En esta primera aproximación, realizada en esta investigación, se ha obtenido un modelo que permite flexibilidad a la hora de introducir parámetros y valores de variables, esto facilita a un investigador enfrentar casos de estudios de centrales maremotérmicas de ciclo abierto o de Anderson emplazadas en tierra conectadas al SEN.

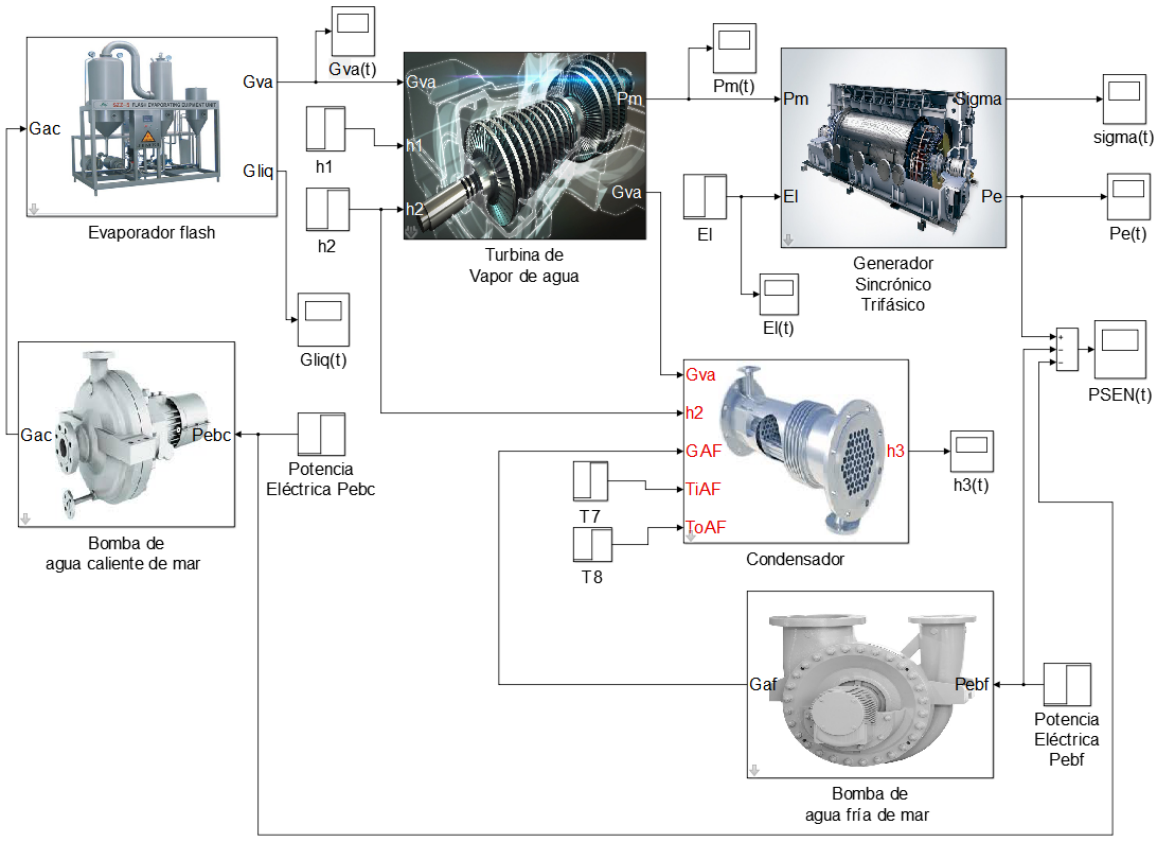

Figura 13. Modelo en MatLab/Simulink® de centrales maremotérmicas de ciclo abierto o de Anderson conectadas al SEN. **(Fuente: el autor)**

04 RESULTADOS DE LA EJECUCIÓN DEL MODELO

Se toma, a manera de caso de estudio, una central emplazada en la costa que se conecta al SEN, red eléctrica trifásica que mediante transformadores en cada fase alimenta a un poblado costero, y se cuentan con los datos para la simulación que se relacionan a continuación:

- El generador sincrónico trifásico se conecta a la alimentación trifásica, esta tiene un valor de la tensión eficaz de línea de 190,53 V.
- El generador es trifásico de 4 pares de polos, X_s de 0,5 Ω y k_F de 100 Nms/rad. Se alimenta la excitación del generador de modo tal que E_I es 225,17 V.
- La potencia motriz desarrollada por la turbina es de 80,802 kW, para lo cual la entalpía del vapor de agua a la entrada de esta es de 2 583,9 kJ/kg y a la salida de 1 865,2 kJ/kg.
- El evaporador flash opera con una presión de 10 kPa.
- La bomba de agua caliente de mar tiene una eficiencia de 0,80 y mueve el fluido superando las siguientes pérdidas de carga, por tubería de tramo recto 3 000 m, por curvatura en la tubería de 200 m y en el evaporador de 300 m. La potencia que consume el motor eléctrico que mueve dicha bomba es 5,600 kW.
- La potencia consumida por el motor de la bomba de agua fría es 8,000 kW.

A partir de estos datos se desea responder a las siguientes interrogantes, cuál es el valor de la potencia producida por el generador eléctrico, cuánta potencia esta central es capaz de suministrar al SEN, qué parte es la potencia eléctrica aportada al SEN de la producida por el generador, cuánto es el flujo másico de agua que entrega la bomba de agua caliente de mar y el flujo másico del vapor obtenido por el evaporador.

Para responder a las interrogantes anteriores se emplea el modelo, mostrado en la figura 9, desarrollado en esta investigación en MatLab/Simulink®; se introducen en el modelo los datos anteriores y se ajusta el tiempo de simulación a 3 segundos. Luego de simular el modelo se obtienen los gráficos, que se muestran en la figura 10, con las diferentes variables. Los valores de estas variables a estado estacionario permiten responder las interrogantes.

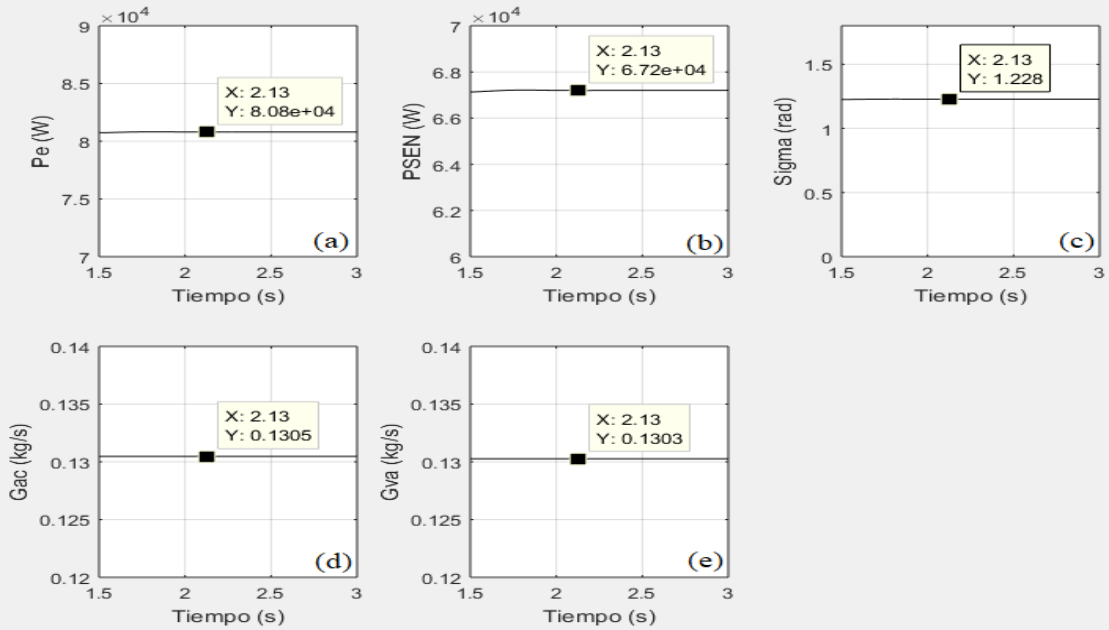

Figura 14. Gráficas de: (a) potencia eléctrica del generador, (b) potencia suministrada al SEN, (c) ángulo de potencia δ, (d) flujo másico de agua caliente y (e) flujo másico de vapor. **(Fuente: el autor)**

En el gráfico de la figura 10 (a) se observa que la potencia entregada por el generador eléctrico es de 80,800 kW, valor aproximadamente igual a la potencia motriz de la turbina, con un ángulo de potencia de 1,228 rad eléctrico. Esto responde la primera interrogante. De la figura 10 (b) se obtiene que la potencia que la central le entrega al sistema eléctrico es de 67,2 kW, valor menor que la potencia producida por el generador eléctrico, esta diferencia se debe a que en la operación de la planta se consumen 5,600 kW y 8,000 kW por la bomba de agua caliente y la de agua fría respectivamente. Lo anterior indica que para la operación de esta central en las condiciones dadas se necesita 13,600 kW. Esta discusión responde la segunda interrogante. La fracción que representa la potencia aportada al SEN respecto de la entregada por el generador eléctrico, es 67,2 kW entre 80,800 kW aproximadamente igual a 0,83 o el 83%, valor que se considera aceptable. El valor de esta fracción responde a la tercera interrogante. Las respuestas a las interrogantes restantes se obtienen de las gráficas (d) y (e) de la figura 10. Para las condiciones dadas el flujo másico de agua que entrega la bomba de agua caliente de mar es de 0,1305 kg/s y el flujo másico del vapor obtenido por el evaporador es de 0,1303 kg/s. Al comparar los valores de ambos flujos se nota que el evaporador, bajo las condiciones dadas, evapora casi el 100% del agua.

El valor del ángulo de potencia en estado estacionario es 1,228 rad eléctrico, o 70,36 grados eléctricos. Como este valor es menor a 90 grados eléctricos, según criterio establecido en (Fitzgerald 1996), se afirma que el generador eléctrico opera de forma estable. Si requerimientos impuestos por la curva de capacidad del generador dictan que este debe operar con un ángulo de potencia máximo de 60 grados eléctricos, una vía para reducir el valor de este ángulo a 60 grados eléctricos en estado estacionario sin modificar la potencia suministrada por la turbina y por tanto la potencia eléctrica

suministrada a la red, es aumentar la excitación de modo que E_f incremente su valor a 244,85 V, como puede verificarse de la ecuación 20.

05 CONCLUSIONES

En esta primera aproximación se obtuvo el diagrama funcional de centrales maremotérmicas de ciclo abierto o de Anderson emplazadas en tierra y conectadas al SEN. A partir de este se determinó el modelo matemático de cada componente y luego se obtuvo el modelo matemático de dichas centrales maremotérmicas en MatLab/Simulink®. Este modelo de centrales maremotérmicas dota al diseñador de un esquema de simulación en MatLab/Simulink® flexiblemente configurable para enfrentar casos de estudios, y para el escenario analizado dicho modelo arrojó que el porciento de potencia que el sistema aporta al SEN es del 83% de la potencia total producida por el generador eléctrico.

06 REFERENCIAS

Abreu Del Sol M. C. (2021). "Selección de sitios para la obtención de energía maremotérmica terrestre utilizando tecnología satelital", Trabajo de Diploma, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Universidad de La Habana, extraído de: https://www.researchgate.net/publication/365285118

Cortés Falcón M. F. (2020). "Diseño de intercambiadores de calor para intensificar el proceso de obtención de glucosa en la UEB Chiquitico Fabregat", Revista Centro Azúcar, 47: 10-21, ISSN: 2223-4861, extraído de: https://n9.cl/syfgs

Castellano Sánchez A. O., Lago Solano R. D. y Bory Prévez H. (2022). "Programa para determinar los parámetros que caracterizan el oleaje marino y simular su comportamiento", Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 43(2), ISSN 2788-6050, extraído de: https://riha.cujae.edu.cu/index.php/riha/article/view/585

Fitzgerald A. E. (1996). "Máquinas Eléctricas", Sexta Edición, Editorial McGraw-Hill, ISBN: 9789701040522, México, extraído de: https://www.sidalc.net/search/Record/cat-unco-ar-55152

Gil Alba R. (2017). "Estudio sobre la implantación de la tecnología maremotérmica". Tesis de Ingeniería en Tecnologías Industriales, Universidad Carlos III de Madrid, España, extraído de: http://hdl.handle.net/10016/27764

Green D. W. and Southard M. Z. (2019). "Perry's Chemical Engineers' Handbook", 9th Edition, McGraw-Hill Education, ISBN: 978-0-07-183409-4, extraído de: https://www.booksfree.org/wp-content/uploads/2022/03/perrys-chemical-engineers-handbook-ninth-edition_compressed.pdf

Heredia Díaz A., Bory Prevez H. y Castellano Sánchez A. O. (2023). "Comparación de tres esquemas de centrales maremotérmicas", Maestro y Sociedad, 20(4): 953-958, e-ISSN 1815-4867, extraído de: https://maestroysociedad.uo.edu.cu/index.php/MyS/article/view/6187

Ishaq H. and Dincer I. (2020). "A comparative evaluation of OTEC, solar and wind energy based systems for clean hydrogen production", Journal of Cleaner Production, 246, ISSN 0959-6526, extraído de: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118736

Lorenzo Carralero J. E., Castellano Sánchez A. O. y Bory Prévez H. (2023). "Simulación en Matlab de dispositivos WEC". Maestro y Sociedad, (Número Especial): 125-131, e-ISSN 1815-4867, extraído de: https://maestroysociedad.uo.edu.cu/index.php/MyS/article/view/6249

Vera D., Baccioli A., Jurado F. and Desideri U. (2020). "Modeling and optimization of an ocean thermal energy conversion system for remote islands electrification", Renewable Energy, 162: 1399-1414, ISSN 0960-1481, extraído de: https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.074

CONFLICTO DE INTERESES

The authors declare that there are no conflicts of interest.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Henry Bory Prevez https://orcid.org/0000-0001-5508-0501

Trabajó en el diseño de la investigación, realizó la modelación matemática en MatLab/Simulink®, búsqueda de información, interpretación de los resultados y revisión del informe final.

Angel Orlando Castellano Sanchez https://orcid.org/0000-0001-7996-5611

Participó en el diseño de la investigación, búsqueda de información, revisión, análisis de los resultados y en la redacción del informe final.