

ORIGINAL

SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN EN UN SISTEMA DE RIEGO POR PIVOTE CENTRAL

Simulating the pressure performance in a center-pivot irrigation system

Ing. Yennys Cuscó-Varona, Profesora Asistente, Universidad de Granma,

ycuscov@udg.co.cu , Cuba

Dr. C. Yans Guardia-Puebla, Profesor auxiliar, Universidad de Granma,

yguardiap@udg.co.cu , Cuba

Ing. René Misael Áreas-Hidalgo, profesor asistente, Universidad de Granma,

rareash@udg.co.cu, Cuba

Recibido: 08/10/2017- Aceptado: 14/11/2017

RESUMEN

En el presente trabajo se simuló el comportamiento de la presión en una máquina de riego por pivote central aplicando distintas metodologías: método analítico, el programa profesional EPANET y la Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) del paquete informático SolidWorks 2014. Se detectaron deficiencias en la predicción de la presión por el método analítico; mientras, el programa informático que EPANET no fue efectivo, ya que tiene como inconveniente que no tiene en cuenta las pérdidas locales, las cuáles son significativas en estas tecnologías. La Dinámica Computacional de Fluidos predijo acertadamente el comportamiento de la presión en las máquinas de riego por pivote central; además, permite realizar la simulación de varias variables importantes que caracterizan hidráulicamente los sistemas de riego.

Palabras claves: máquina de riego; presión; método analítico; Dinámica Computacional de los fluidos (CFD).

ABSTRACT

In this work, the behavior of the pressure in a central-pivot irrigation machine was simulated applying different methodologies: analytical method, the EPANET professional program and the Computational Fluid Dynamics (CFD) of the SolidWorks 2014 software package. Deficiencies

were detected in the prediction of the pressure by the analytical method; meanwhile, EPANET computer program was not effective, since it has the disadvantage that it does not take into account the local losses, which are significant in these technologies irrigation. Computational Fluid Dynamics correctly predicted the behavior of pressure in central-pivot irrigation machines; it also allows the simulation of several important variables that hydraulically characterize the irrigation systems.

Key words: central-pivot irrigation machine; pressure; analytical method; Computational Fluid Dynamics (CFD).

INTRODUCCIÓN

La agricultura de regadío es esencial para la economía, la salud y el bienestar de la población ya que es uno de los factores más importantes para la seguridad alimentaria del planeta (Pérez, 2004); por tanto, tiene un papel importante en el aumento de la producción de alimentos en las décadas recientes (Barrionuevo y Feler, 2014; Pacheco, 2011).

El hecho de que el agua sea un recurso cada vez más escaso y exista más competencia entre los diversos usos, obliga a utilizarla de forma apropiada y manejar con eficiencia su mecanismo de gestión (Tarjuelo, 2005). La demanda de alimentos en el futuro dependerá de la intensificación de la agricultura y de la apropiada gestión del agua, maximizando los rendimientos agrícolas producidos por cada metro cúbico de agua utilizada (Cisneros et al., 2014; Pacheco, 2011).

En la actualidad, aproximadamente el 59,7 del total de agua planificada para todos los usos en Cuba se utiliza en la agricultura; no obstante, solo el 10 % se convierte directamente en productos agrícolas (Durruthy y Robaina, 2016). Por eso, se impone la introducción de nuevas tecnologías, que permitan hacer un uso eficiente del recurso agua, cada vez más escaso en muchas zonas agrícolas (Placeres et al., 2013).

El pivote central, es uno de los equipos de mayor uso y de nivel tecnológico que se aplica actualmente para el riego de zonas agrícolas, el cual consiste en la aplicación del agua mediante aspersion a los cultivos (Eugenio Rodríguez y Troncoso, 2005). En nuestro país se han realizado importantes inversiones de estas tecnologías, las provincias La Habana y Matanzas son las regiones donde se encuentran instaladas más máquinas de este tipo; sin embargo, en la provincia de Granma, también se han hecho significativas inversiones.

Las principales investigaciones de las máquinas de riego por pivote central se han dirigido, fundamentalmente, al estudio energético, la calidad del riego, el cálculo del coeficiente de

uniformidad (CU), el cálculo hidráulico y la simulación de los aspersores y difusores. No obstante, son escasos los estudios reportados sobre el cálculo y simulación del comportamiento de las presiones, velocidades y pérdidas hidráulicas en la tubería lateral del sistema de riego. (Lisiuk et al. 2007) evaluaron el comportamiento de las pérdidas de carga por tres métodos diferentes en un sistema de pivote central.

Por otro lado, (Dean et al. 2010), dentro de los aspectos básicos del diseño hidráulico en un sistema de avance frontal, describieron el método de cálculo de descargas y presiones en el sistema de tuberías correspondientes a la modelización realizada. También, (Valipour 2012), determinó las pérdidas de presión, la fricción, la velocidad y el número de Reynolds evaluando en un sistema de pivote central. Este autor realizó la simulación de la máquina usando el programa PipeLoss, concluyendo que la presión es el parámetro más sensible comparado con los otros estudiados. Mientras, (Tabuada 2014) simuló el comportamiento de las pérdidas por fricción en la tubería lateral de una máquina de pivote central.

La investigación se aplicó para un sistema de un solo y multidiámetro, en el que se presentó una metodología de cálculo que describe, de forma general de las pérdidas por fricción. En estos trabajos no se determinó el comportamiento de la presión en la tubería principal y en los bajantes laterales, variable que es sensible y fundamental en la eficiencia hidráulica del sistema.

Por tanto, el objetivo de este trabajo fue simular el comportamiento de la presión en una máquina de pivote central usando varios métodos de cálculo. Se estudiaron 3 métodos de cálculo para determinar las presiones en el sistema: método analítico y el uso de 2 programas profesionales: EPANET y el módulo de Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) del programa SolidWorks.

Población y muestra

Características técnicas de la máquina de riego.

El estudio se realizó evaluado una máquina de pivote central eléctrica Bayatusa, modelo 6 5/8" (162 mm), de procedencia cubana, perteneciente a la Empresa Mecánica Bayamo. Esta máquina está compuesta por 7 tramos de 54.86 m y un tramo es voladizo de 16 m, sin cañón en la parte final, para una longitud total de 400 m. Cada tramo cuenta con 27 aspersores, excepto el primer tramo el cual tiene 22 aspersores; además, existen 8 aspersores en el

voladizo. Los aspersores se encuentran espaciados en una distancia de 1.92 metros. El sistema tiene una tubería portaemisores de acero galvanizado, con diámetro exterior 168 mm, diámetro interior de 162 mm y 3 mm de espesor, mostrando un ahusamiento en el voladizo final.

Los bajantes donde están ubicados los emisores, tienen forma de cuello de cisne, los cuáles son de acero galvanizado y un diámetro de $\frac{3}{4}$ " (19 mm). Cada bajante tiene una extensión de goma, la cual llega hasta una altura aproximada de 1,5 metros con respecto a la horizontal del terreno. Los emisores son fijos, del tipo D3000 Nelson Sprayhead y emiten un caudal en forma progresiva hacia el final del sistema de riego, con el objetivo de depositar un caudal constante. El sistema de riego abarca un área total de 50,26 ha, con un funcionamiento circular (360°).

El sistema de bombeo está compuesto por una bomba centrífuga marca GRUNDFOS, tipo: NB100-200/173X-F-A-BAOE, modelo: A98124818P212020002, con las siguientes características: $Q = 329.9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, $H = 43.2 \text{ m}$ y $n = 3575 \text{ min}^{-1}$; además, no posee sistema de filtrado.

Metodología de cálculo de la presión.

Para el cálculo de la presión se ubicaron nudos de caudal a lo largo de la tubería maestra, donde una ésta con cada bajante, para un total de 292 nudos. Los cálculos de presión se realizaron por tres metodologías diferentes, con la finalidad de seleccionar el mejor método de simulación.

Para determinar el gasto de cada aspersor se aforó el caudal en cada uno de los bajantes; para esto se utilizó un recipiente de 4.18 L de capacidad. Primeramente se midió el tiempo de llenado del recipiente con un cronómetro y aplicando la ecuación $Q = \frac{V}{t}$ se determinó el caudal de cada aspersor. Se consideró que el caudal total a la entrada de la máquina fue la suma del caudal de cada uno de los 192 aspersores; también se determinó el caudal en cada tramo siguiendo el mismo procedimiento. La determinación del caudal es un dato fundamental para los tres procedimientos de cálculo de la presión que se describen a continuación.

Procedimiento de cálculo de la primera metodología: Método Analítico.

Se determinaron las presiones en cada tramo aplicando la ecuación de Bernoulli:

$$Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} = Z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + \sum \text{[]} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde: Z es la altura geométrica o de posición; $\frac{v^2}{2g}$ es la altura cinética; $\frac{P}{\gamma}$ es la altura piezométrica; $\sum h_f$ es sumatoria de las pérdidas hidráulicas.

Despejando la presión en la Ec. 1, queda:

$$\frac{P_2}{\gamma} = \frac{P_1}{\gamma} + \left(\frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} \right) - \sum h_f \quad (\text{Ec. 2})$$

Para este caso, la diferencia de altura $Z_1 - Z_2$ se consideró como cero, ya que se asumió una pendiente horizontal (nula).

Procedimiento de cálculo de la segunda metodología: EPANET.

EPANET es un programa informático profesional que realiza simulaciones en periodos prolongados del comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en redes de suministro a presión. El programa efectúa un seguimiento de la evolución de los caudales en las tuberías, las presiones en los nudos, los niveles en los depósitos, y la concentración de las especies químicas presentes en el agua, a lo largo del periodo de simulación discretizado en múltiples intervalos de tiempo.

Además, determinar el tiempo de viaje del fluido desde las fuentes (depósitos y embalses) hasta los nodos del sistema, así como simular el comportamiento de elementos más complejos como son las bombas y válvulas (Eck, 2016; Seyoum y Tanyimboh, 2016).

El programa calcula las pérdidas de carga mediante las fórmulas de Hazen-Williams, de Darcy-Weisbach o de Chezy-Manning. El programa EPANET permite realizar varios cálculos hidráulicos: 1), contempla la determinación de las pérdidas menores en codos, accesorios, entre otros.; 2), admite el cálculo de bombas de velocidad fija o variable; 3), determina el consumo energético y sus costes en un sistema hidráulico; 4) permite modelar varios tipos de válvulas, tales como válvulas de corte, de retención y reguladoras de presión o caudal; 5), admite calcular depósitos de geometría variable; 6), permite considerar diferentes tipos de demanda en los nudos, cada uno con su propia curva de modulación en el tiempo; 7), puede modelar salidas de agua cuyo caudal dependa de la presión; 8), admite leyes de control simples, basadas en el valor del nivel en los depósitos o la prefijada por un temporizador; 9) así como plantear leyes de control más complejas basadas en reglas lógicas.

En este programa se realizó el diseño del sistema de riego a partir de una estación de bombeo, donde se fijaron las características de la bomba, y luego fue diseñado el lateral de la máquina de pivot con su tubería principal de diámetro constante y presión inicial igual al valor calculado. Posteriormente, se ubicaron los nudos de caudal en la unión de cada bajante con dicha tubería, y se colocó el resto de los nudos en la unión del bajante con el aspersor, por lo que los cálculos hidráulicos se ejecutaron entre nudos sin tener en cuenta la influencia de los aspersores.

Procedimiento de cálculo de la tercera metodología: Dinámica Computacional de los Fluidos (CFD).

SolidWorks® es un programa de diseño mecánico en 3D que utiliza un entorno gráfico basado en Microsoft® Windows®, intuitivo y fácil de manejar. Su filosofía de trabajo permite plasmar sus ideas de forma rápida sin necesidad de realizar operaciones complejas y lentas. Actualmente la herramienta de diseño mecánico SolidWorks® se emplea en sectores tan diversos como el Aeroespacial, Automoción, Defensa, Educación y Universidades, Ingeniería Civil, Ingeniería Industrial, Ingeniería Marina, Ingeniería Mecánica, investigación y desarrollo, y en la simulación de estructuras estáticas y de fluidos, entre otros campos (Gómez, 2008).

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), es una rama de la mecánica de fluidos que estudia la resolución de problemas de flujos de sustancias a partir de métodos numéricos y algoritmos, el desarrollo de los ordenadores ha permitido el uso de esta valiosa herramienta, que de forma aproximada, consigue dar solución a ecuaciones que no pueden ser resueltas de manera general mediante solución analítica (Moreno, 2016). El estudio con CFD permite una mayor comprensión de las características del flujo, siendo este conocimiento indispensable para realizar mejoras de diseño (Lisiuk et al., 2007).

Para la simulación del comportamiento interno del fluido en la máquina de riego de pivote central se empleó el método de CFD, implementado en la herramienta de Flow Simulation del Solidworks®. Las condiciones de contorno, se ubicaron en la entrada y salida de cada tramo, de modo que el modelo quedara cerrado como lo exige la herramienta. Para el análisis de la máquina, el modelo se dividió en ocho dominios computacionales, correspondiendo con cada una de las secciones. El mallado empleado fue del tipo automático con un nivel de precisión tres, con forma de paralelepípedo rectangular cuyas fronteras son ortogonales con respecto al Sistema Global de Coordenadas Cartesiano, para un total de 130268 elementos.

Análisis de los resultados

En la tabla 1, se muestran los valores de presión para 61.76 L/s haciendo uso de los tres métodos. Mientras, la figura 1 muestra la simulación del comportamiento de la presión usando los 3 métodos evaluados: analítico, EPANET y CFD. La presión a través del primer método decrece hasta llegar a un valor negativo en los últimos nudos del voladizo, obteniéndose una caída de presión cercano a los 14 mca; sin embargo, el segundo método muestra una caída de presión hasta el orden de los 7.2 mca, debido a que el programa EPANET no tiene en cuenta la influencia de las pérdidas locales.

Tabla 1. Comportamiento de presiones para 61.76l/s.

Tramo	Longitud (m)	Número de difusores	Caudal (l/s)	Presión (mca) Analítico	Presión (mca) EPANET	Presión (mca) CFD
1	54.86	22	61.76	13.86	13.5	13.66
2	54.86	27	60.46	12.35	11.96	12.28
3	54.86	27	56.69	10.51	10.22	10.33
4	54.86	27	50.49	8.69	8.76	7.88
5	54.86	27	43.75	7.02	7.6	5.57
6	54.86	27	33.08	4.99	6.82	3.22
7	54.86	27	20.3	2.70	6.43	1.24
Voladizo	16	8	5.23	-0.037	6.31	0.59
Total	400	192				

No obstante, a través del último método (CFD), la caída de presión llega hasta los 13.6 mca. Este método de simulación es más eficiente, ya que tiene en cuenta en su metodología el cálculo de ambas pérdidas (locales y rozamiento); también el método permite tener en cuenta la curvatura del sistema.

La presión en un sistema de riego por pivote central

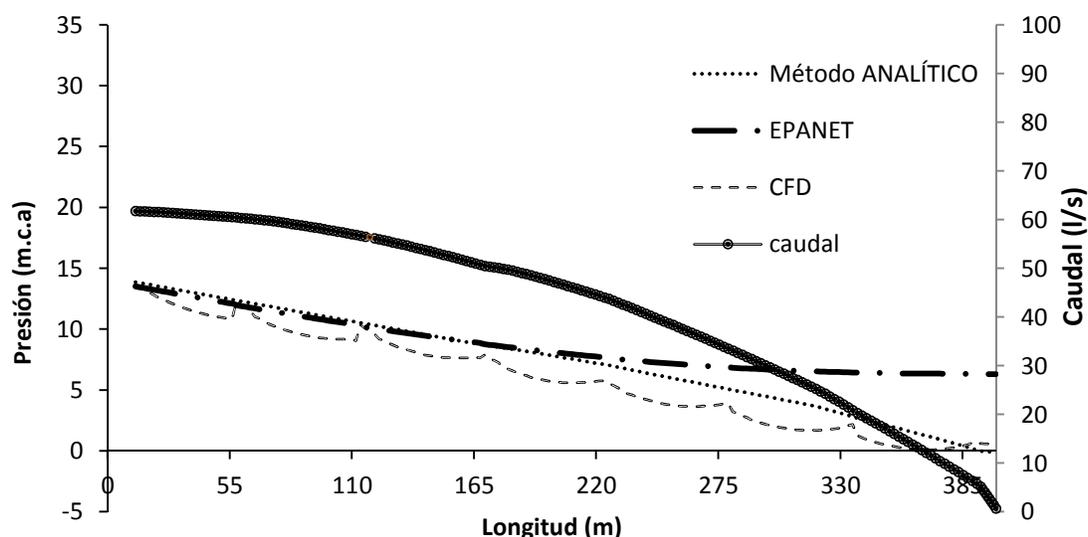


Figura 1. Comportamiento de la presión por los tres métodos para un caudal entregado de 61.76 l/s.

La caída de presión a través de los tres métodos se debe a la influencia de las pérdidas de energía, teniendo más influencia en el primer y tercer método, en los cuales, sus metodologías calculan las pérdidas hidráulicas, tanto las locales como las de rozamiento, ya que en el segundo método solo tienen en cuenta las pérdidas por rozamiento.

Al no tener en cuenta las pérdidas locales, se incluye en el modelo un error elevado, lo que disminuye la precisión del programa EPANET para modelar este tipo de sistema; además, esta tecnología tiene un elevado número de difusores (192), con sus respectivos bajantes o cuellos de cisne; por lo tanto, son significativas las sumatorias de las pérdidas locales en el sistema, factor que influencia el comportamiento de la presión en una máquina de pivote central.

Se evidencia una alta precisión por el método CFD, lo cual es ventajoso para simular la variable a estudiar, en este caso la presión, mediante un programa informático. Haciendo uso de esta herramienta se procedió a evaluar el comportamiento de la presión en la tubería principal del sistema por pivote central.

En la figura 2 anterior se muestra el comportamiento de la presión a lo largo del recorrido de la maestra para un caudal, que va desde 61.76 L/s hasta un valor de cero en la parte final del voladizo. Se simularon cada uno de los tramos comprendidos entre dos torres hasta llegar al voladizo, teniendo en cuenta todos los factores que influyen en la misma. Se observa una disminución gradual de la presión a lo largo de la maestra, en el que se refleja la influencia de las pérdidas tanto, locales como de rozamiento, que son las de mayor incidencia, provocando la

caída de la rasante hidráulica a lo largo del conducto con una caída de presión sobre los 13 mca.

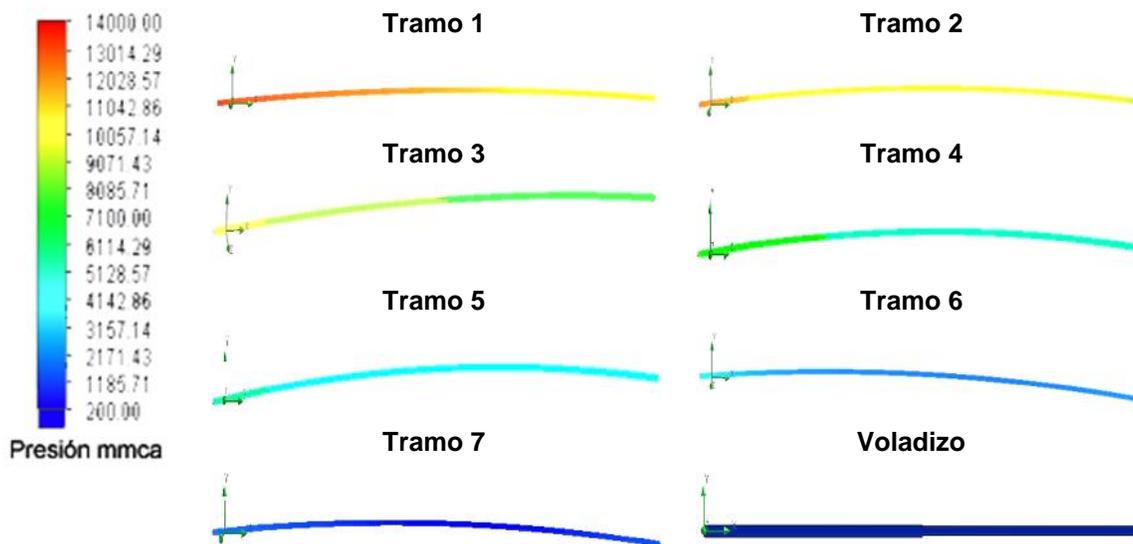


Figura 2. Comportamiento de la presión en la tubería principal de la máquina de riego. Simulación por el método CFD.

Como se ha mencionado anteriormente, las pérdidas locales tienen una significativa influencia en el comportamiento de las pérdidas hidráulicas y, por tanto, influyen directamente en el perfil de presión de la máquina de riego. Estas están presentes en la unión de la tubería del bajante de 19 mm con la tubería principal de 162 mm; por tanto, se procedió a realizar la simulación del comportamiento de la presión en los bajantes.

La figura 3, muestra la simulación de la presión en los bajantes. Para no presentar la simulación de los 192 bajantes, se presenta el comportamiento de la presión en el bajante inicial de cada tramo, así como la del voladizo. A través de la gama de colores se observa que, a medida que el agua va pasando a través de la tubería principal se hay una reducción de la presión.

En todos los casos los bajantes tienen prácticamente el mismo comportamiento: se obtienen rangos de presiones diferentes, debido a la disminución de la presión a lo largo de la maestra y, por tanto, en cada bajante correspondiente a cada tramo de la tubería principal. Además, existe una tendencia de que la presión aumenta en la salida de los emisores del bajante, siendo la presión ligeramente inferior en la tubería principal. Por esa razón, se procedió a estudiar el comportamiento de la presión en un bajante del sistema.

En la figura 4 se muestra la distribución de la presión a lo largo de un bajante. Como se observa, las presiones aumentan hacia la parte final del bajante, según va ganando en longitud

el conducto va aumentando la presión de éste, debido a la altura de carga de 3 metros desde la tubería principal hasta el final del bajante. Estos resultados demuestran que la cantidad de energía de posición que posee la masa, depende de la elevación del plano de referencia.

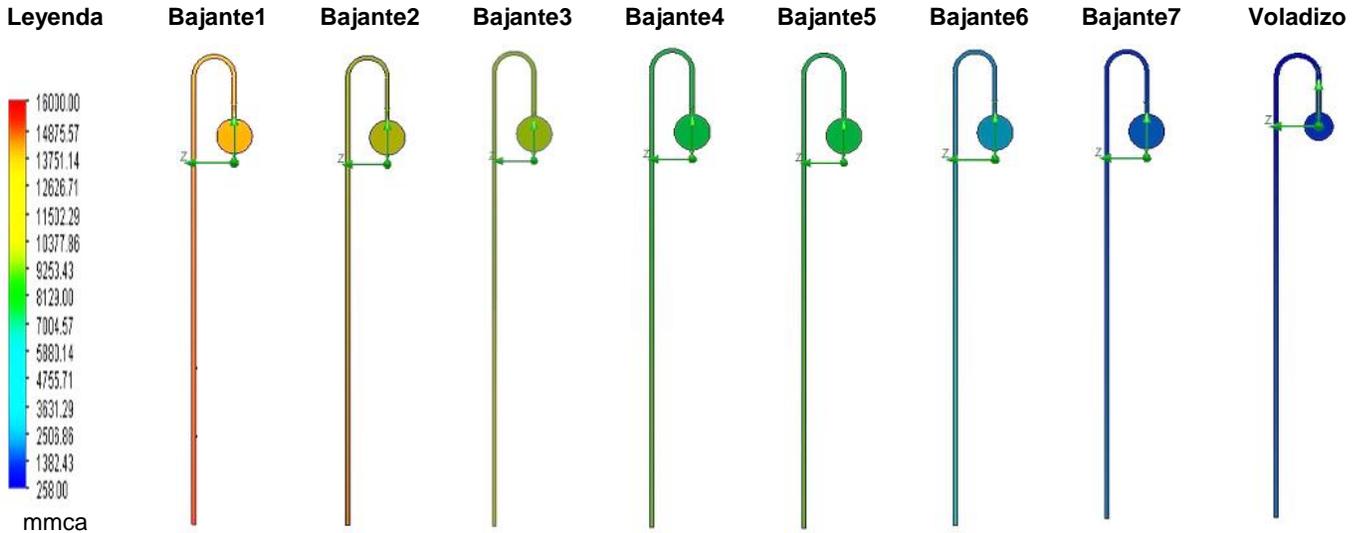


Fig. 3. Comportamiento de la presión en los bajantes. Se presenta el bajante inicial de cada tramo y del voladizo. Simulación por el método CFD.

Durante el riego, la velocidad del agua varió a lo largo de la tubería principal, puesto que al actuar simultáneamente todos los emisores, cada uno de ellos descarga su correspondiente caudal de riego a distancias constantes, constituyendo de esta manera una tubería de caudal variable (Dean et al., 2010). Las ecuaciones básicas de conservación de la masa y de energía, bajo los supuestos de flujo estacionario – unidimensional – incompresible - viscoso, rigen el comportamiento del modelo (Lisiuk et al., 2007)

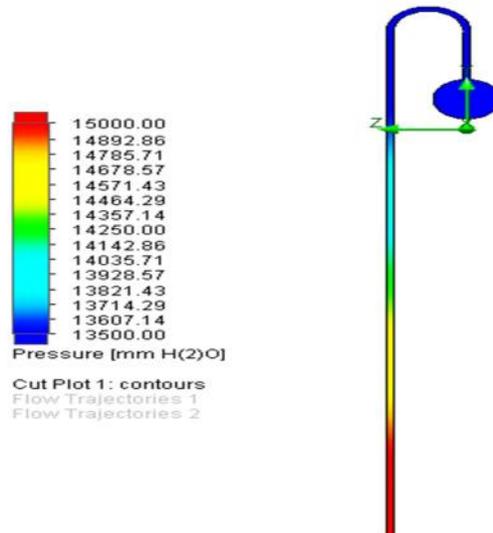


Fig. 4. Comportamiento de la presión en un bajante. Simulación por el método CFD.

La tubería principal, si bien constructivamente tiene una pequeña curvatura por razones estructurales, se considera en posición horizontal (pendiente nula) y conformada con fines de análisis con tramos de longitud constante entre nudos de bajantes sucesivos (Dean et al., 2010). Esta consideración se tuvo en cuenta solo para el análisis de las dos primeras metodologías utilizadas, porque para el caso de la tercera se simuló el sistema haciendo uso de la curvatura.

CONCLUSIONES

1. Para la simulación del comportamiento de la presión en una máquina de pivote central se detectaron deficiencias por el método analítico, ya que al aumentar el número de iteraciones necesarias para el cálculo **se incrementa** se reduce la capacidad de predicción.
2. El programa informático EPANET no es efectivo para realizar una predicción del comportamiento de la presión en una máquina de pivote central, ya que tiene como inconveniente que no tiene en cuenta las pérdidas locales, las cuáles son significativas en un sistema de riego.
3. La Dinámica Computacional de Fluidos del paquete informático SolidWorks predice acertadamente el comportamiento de la presión en las máquinas de riego por pivote central; además, permite realizar la simulación de varias variables importantes que caracterizan hidráulicamente los sistemas de riego.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Barrionuevo, N., y Feler, M. V. (2014). Evolución del área regada por pivote central en la provincia de Córdoba en el período 1994-2014. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG)*(6), 133-144.
2. Cisneros, E., González, A., García, A., Placeres, Z., y Jiménez, E. (2014). Evaluación y propuesta de medidas en diferentes técnicas de riego por aspersión para un uso eficiente del agua. *INGENIERÍA AGRÍCOLA*,, 4, 22-28.
3. Dean, R. A., Maglione, L. S., y Pianucci, A. (2010). *Aspectos básicos del diseño hidráulico de un sistema de riego por aspersión de avance frontal*. Segundo Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica San Juan.
4. Durruthy, Y., y Robaina, F. G. (2016). Contribución al estudio de las necesidades hídricas de cultivos de interés agrícola en Cuba. *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*.

5. Eck, B. J. (2016). An R package for reading EPANET files. *Environmental Modelling & Software*, 84(Supplement C), 149-154. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.06.027>
6. Eugenio Rodríguez, E., y Troncoso, J. (2005). Evaluación técnica y económica de un sistema de riego por pivote central. *Revistas electrónicas UACH*, 33(2).
7. Gómez, S. (2008). *SolidWorks®* (ALFAOMEGA grupo editor, S.A. 2008 ed.): MARCOMBO, Ediciones Técnicas 2008 MARCOMBO, S.A. .
8. Lisiuk, F., Zabalo, P., y Elaskar, S. (2007). Análisis teórico y por elementos finitos de las pérdidas de carga en un sistema de riego de pivote central. *Mecánica Computacional XXVI*, 26, 1977-1996.
9. Moreno, S. (2016). *Simulación y diseño del modelo de captación de energía en una planta termosolar con Solidworks*. (tesis de grado.), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
10. Pacheco, J. (2011). La crisis mundial del agua: una mirada desde Cuba.(Report).
11. Pérez, R. (2004). El riego de los pivotes y su impacto ambiental en Cuba: reflexiones. (Spanish). *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 25(2), 44-49.
12. Placeres, Z., Jiménez, E., Domínguez, M., Guzmán, J., y Sánche, Y. (2013). Determinación de los parámetros de explotación de las máquinas de pivote central, en las provincias Artemisa y Mayabeque, para satisfacer las dosis necesarias de los cultivos. *Ingeniería Agrícola*, 3(1), 3-7.
13. Seyoum, A. G., y Tanyimboh, T. T. (2016). Investigation into the Pressure-Driven Extension of the EPANET Hydraulic Simulation Model for Water Distribution Systems. *Water Resources Management*, 30(14), 5351-5367. doi: 10.1007/s11269-016-1492-6
14. Tabuada, M. A. (2014). Friction Head Loss in Center-Pivot Laterals with Single Diameter and Multidiameter. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(10), 04014033. doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000755
15. Tarjuelo, J. (2005). *El riego por aspersión y su tecnología.*: Ediciones Mundi-Prensa.
16. Valipour, M. (2012). Scrutiny of pressure loss, friction slope, inflow velocity, velocity head, and Reynolds number in center pivot. *International Journal of Advanced Scientific and Technical Research*, 2(5), 703-711.