

Diseño óptimo de depósitos reguladores utilizando programación lineal

Dr. Norberto Marrero de León
Centro de Investigaciones Hidráulicas.
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Habana.
email: marrero@tesla.cujae.edu.cu

Ing. Alejandro Bosch Fuentes
Centro de Investigaciones Hidráulicas.
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Habana.
email: alebosch86@gmail.com

RESUMEN

En este trabajo se obtienen los volúmenes óptimos de los depósitos reguladores para riego que son abastecidos desde el canal magistral Pedroso–Güira en la provincia de Mayabeque utilizando la técnica de la Programación Lineal Convexa. Los resultados obtenidos permiten comparar los volúmenes óptimos de los cinco depósitos reguladores con los que finalmente fueron construidos, demostrándose las ventajas de las técnicas de optimización en el orden económico. Se determinan además las cargas óptimas en cada uno de los depósitos reguladores.

Palabras clave: depósitos reguladores, optimización, programación lineal, regulación, volúmenes óptimos.

Optimal design of regulatory deposits using linear programming

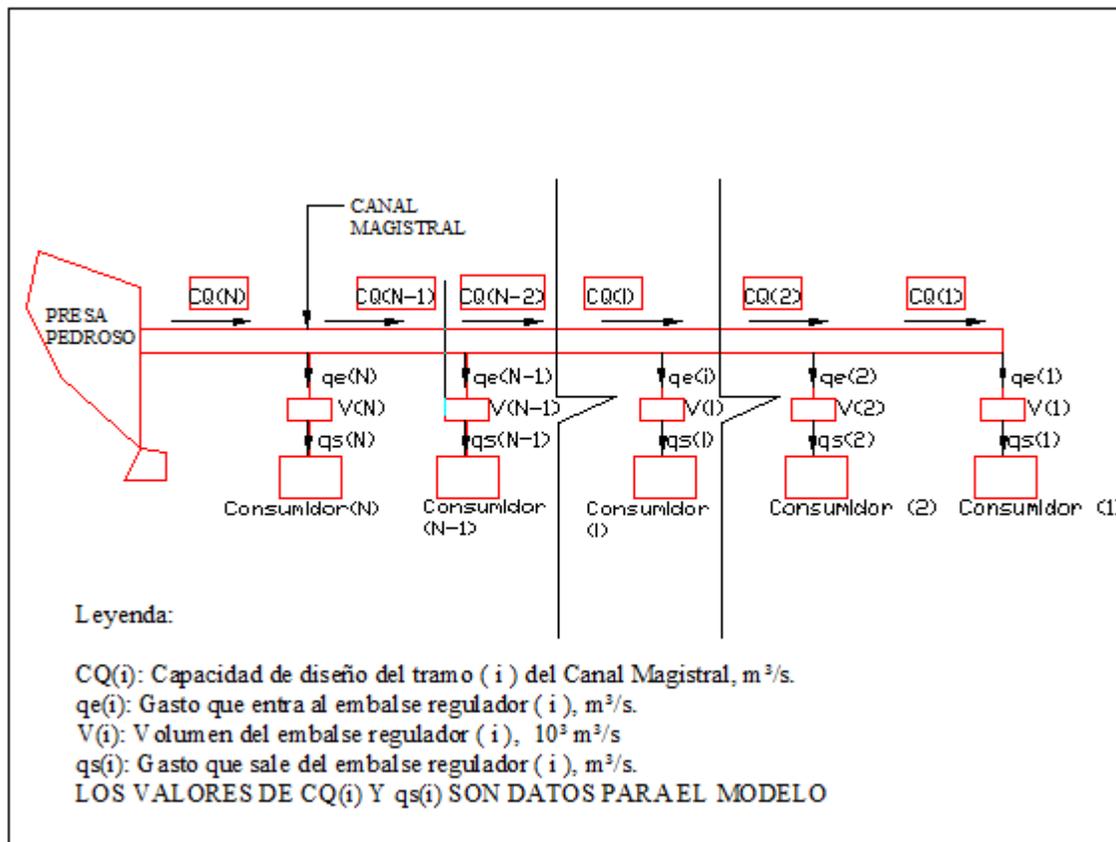
ABSTRACT

In this work optimal volumes for the five regulatory irrigation deposits which are supplied from the main channel Pedroso–Güira, Mayabeque province, are attained by using the Convex Linear Programming technique. Obtained results have allowed comparing optimal volumes of the five regulatory irrigation deposits with volumes actually designed and built by other methods and techniques, demonstrating the benefits of optimization techniques from the economical point of view. Optimal water depths are obtained as well for each of the regulatory deposits

Keywords: regulatory deposits, optimization, linear programming, regulation, optimal volumes.

INTRODUCCIÓN

El proyecto del canal magistral Pedroso-Güira se diseñó y construyó en la década de los 80, dicha obra tiene una longitud de 65 km. Originalmente se tenían previstos once puntos de entrega para abastecer a igual número de sistemas de riego al sur de la antigua provincia de La Habana (figura 1). El problema que se planteaba entonces, después de la construcción del canal, era determinar los volúmenes de los depósitos reguladores necesarios tomando en consideración las restricciones de las demandas de los once consumidores así como las capacidades de conducción de los diferentes tramos del canal. El canal fue diseñado para conducir $10 \text{ m}^3/\text{s}$ libres y $12 \text{ m}^3/\text{s}$ forzados, disminuyendo el bordo libre del canal para aumentar su capacidad de conducción en condiciones extremas.



Marrero (1986), desarrolló en su tesis de doctorado un modelo matemático que se resuelve utilizando la Programación Lineal Convexa (por “tramos”) para diseñar el volumen mínimo total necesario de los once tanques o depósitos reguladores que son abastecidos por el canal magistral Pedroso-Güira, prácticamente terminado en aquellos años, obteniendo las demandas de los consumidores de entidades agrícolas según los tipos de cultivo, las horas de riego, los periodos y los intervalos de riego.

Las demandas de riego y las capacidades de conducción por tramos del canal magistral fueron consideradas como restricciones del modelo matemático de optimización.

Es necesario aclarar que cuando se construyó el canal no se conocía la forma geométrica que finalmente tendrían los depósitos, además no se tenían datos sobre las pérdidas por filtración del

canal las que por el sistema constructivo empleado, era de esperar que fueran aumentando con el decursar del tiempo.

Marrero(1985), Estopiñán y Marrero (1985) y Marrero (1986) coinciden en la necesidad de utilizar modelos matemáticos capaces de obtener los volúmenes óptimos de los depósitos reguladores.

Es necesario realizar labores de mantenimiento periódicas en los canales entre las cuales están la impermeabilización de las juntas para disminuir las pérdidas por filtración como está reflejado en los trabajos de Barceló (2011) y Rodríguez Hernández (2010, 2011).

A principios de la década de los 90 se tomaron importantes decisiones en los planes agrícolas que redujeron a cinco los depósitos reguladores diseñados y construidos (figura 2).

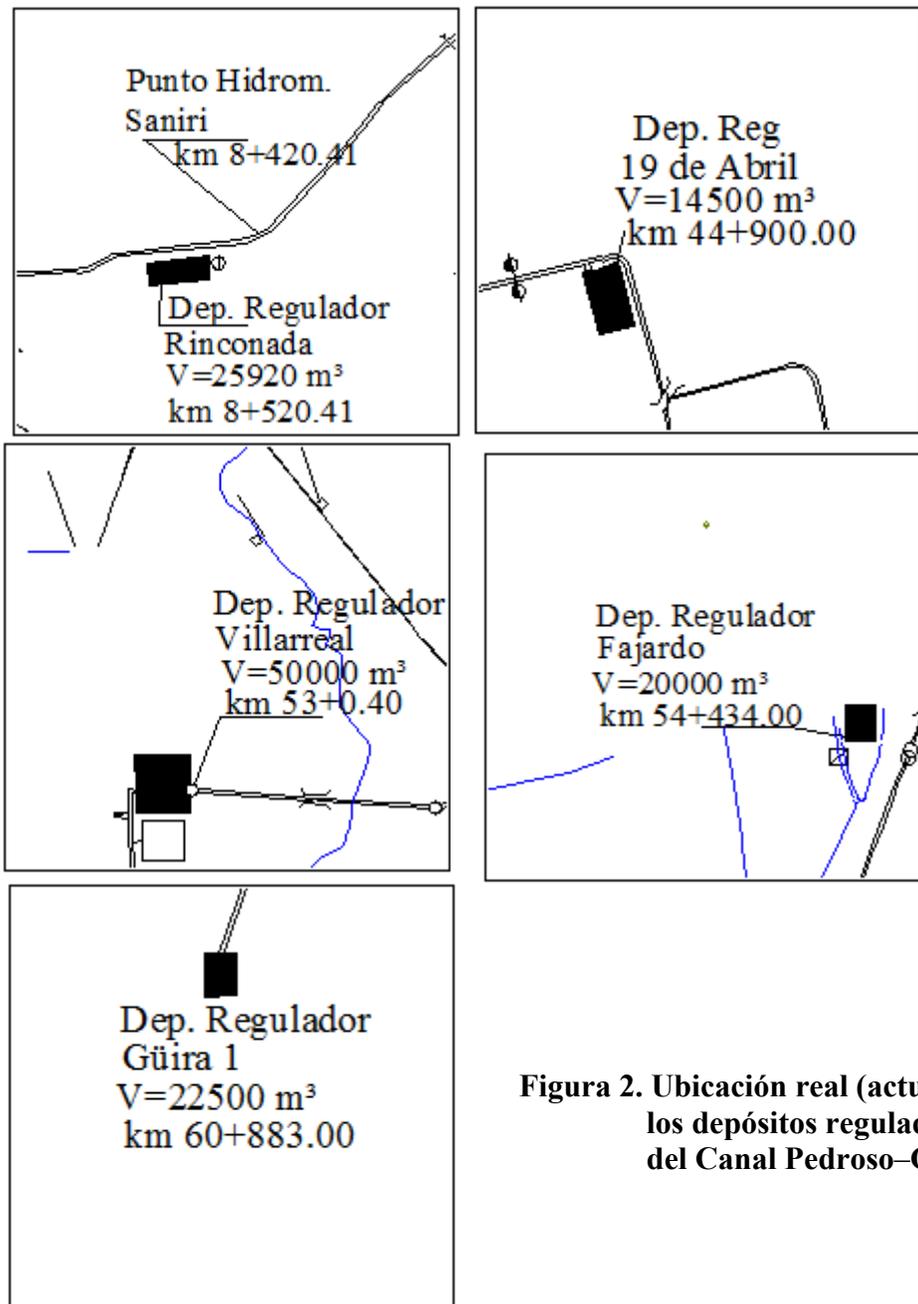


Figura 2. Ubicación real (actual) de los depósitos reguladores del Canal Pedroso-Güira

PROBLEMA A RESOLVER

En este trabajo se pretende demostrar los méritos de las técnicas de optimización, en este caso convencionales como la Programación Lineal, Marrero (1985), al diseñar los volúmenes óptimos necesarios de cuatro depósitos reguladores (uno de ellos no se utiliza) considerando las mismas demandas de riego que en el proyecto original y comparar dichos resultados con los volúmenes construidos, teniendo en cuenta la geometría y las dimensiones reales de las referidas obras de regulación.

Los depósitos reguladores fueron diseñados con el fin de satisfacer la demanda creciente de la agricultura en Mayabeque, debido a que la capacidad de conducción del canal Pedroso Güira, diseñado y construido anteriormente para unas demandas determinadas, no era suficiente para satisfacer el incremento de las mismas, precisadas posteriormente. De ahí, se planteó la necesidad de optimizar dichos volúmenes.

Es necesario aclarar que en el escenario considerado no se consideran las pérdidas por filtración en el canal magistral ni en los propios depósitos reguladores ya que se utilizan tecnologías impermeabilizantes como se explicará más adelante.

Tipos de regulación

Marrero (1986) planteó tres tipos de regulación posibles para los depósitos reguladores que pueden ser: diaria, en intervalo y en hiperintervalo, incrementándose los volúmenes con el tipo de regulación. Nótese que la técnica empleada en la figura 3 es la expresión gráfica clásica de la programación lineal por tramos o convexa, donde la función real del volumen a regular relacionada con el gasto de salida del canal hacia el depósito se representa por tres tramos lineales. El proceso de optimización comienza en el tramo de regulación diaria hasta agotarlo (obsérvese que es el tramo de menor pendiente); si fueran necesarios mayores volúmenes a regular el algoritmo de optimización pasaría a tomar valores del siguiente tramo (regulación en intervalo) y así sucesivamente.

Marrero consideró varios escenarios: el primero no considera las pérdidas por filtración y evaporación en el canal magistral, el segundo considera las pérdidas proporcionales a la longitud del tramo y el tercero considera las pérdidas proporcionales a la longitud y al gasto de circulación por los tramos del canal.

Caso de estudio: Canal magistral Pedroso–Güira

A continuación se presenta el modelo matemático de Programación lineal convexa desarrollado por Marrero (1986), para el caso en que no existan pérdidas por filtración y evaporación. A manera de introducción al modelo, es conveniente aclarar brevemente el significado de las ecuaciones y restricciones que lo componen.

La primera ecuación representa la medida de efectividad o función objetivo, la cual pretende minimizar el volumen total de regulación de los once depósitos. Nótese en dicha ecuación que la primera sumatoria involucra a los once depósitos y la segunda a los tres tipos de regulación explicados anteriormente. Es muy importante aclarar que las variables de decisión son los volúmenes a regular en cada depósito (V_{ik}), por lo que la solución óptima brindará once valores, uno para cada consumidor.

El primer grupo de restricciones corresponde a los tres tipos de regulación mencionados. Obsérvese que todas las restricciones de este tipo dependen de los gastos de salida desde los

depósitos (q_{si}) y de las horas de riego diarias (t_i). En el caso de la regulación en intervalo el volumen a regular depende además del periodo (P_i) y el intervalo de riego (T_i) en cada consumidor, mientras que en la regulación en hiperintervalo se agrega el número de intervalos de riego (N_i).

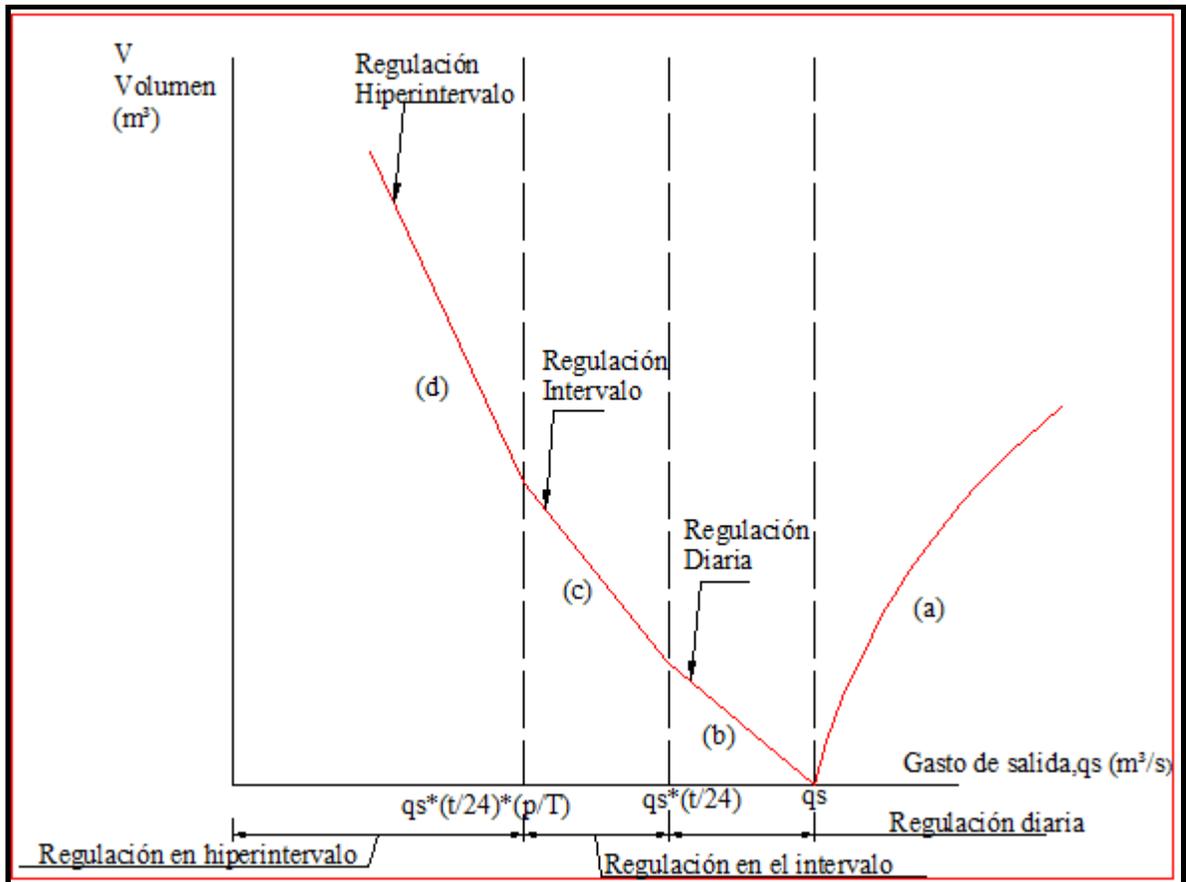


Figura 3. Relación Volumen - Gasto de salida - Tipos de regulación de los depósitos reguladores

En cuanto al segundo grupo de restricciones relacionadas con la capacidad de los diferentes tramos de canal debe señalarse que el término de la izquierda de las inequaciones representa el volumen total a regular por los depósitos el cual debe ser mayor que la diferencia entre la demanda total de los consumidores y las capacidades de conducción de los diferentes tramos del canal.

El modelo matemático de Programación Lineal Convexa desarrollado por Marrero (1986), para el caso que no existan pérdidas por filtración y evaporación fue el siguiente:

$$Min = \sum_{i=1}^{11} \sum_{k=1}^3 V_{ik} \quad (1)$$

Restricciones de regulación en los depósitos:

$$Vi1 \leq 3,6 * qsi * ti(1 - ti/24) \quad (2)$$

$$Vi2 \leq 3,6 * qsi * ti * \left(1 - \frac{Pi}{Ti}\right) * (Pi - 1 + ti/24) \quad (3)$$

$$Vi3 \leq 3,6 * qsi * ti * Pi/Ti * ((Ni - 1) * Ti + Pi - 1 + ti/24) \quad (4)$$

Restricciones de capacidad en los canales:

$$\sum_{j=1}^{11} \sum_{k=1}^3 Ajk * Vjk \geq \sum_{j=1}^{11} qsj - CQi \quad (5)$$

Los valores de Ajk se calculan según el tipo de regulación, Marrero (1986):

$$Aj1 = \frac{1}{3,6 * tj} \quad (6)$$

$$Aj2 = \frac{1}{3,6 * (24 * Pj - 24 + tj)} \quad (7)$$

$$Aj3 = \frac{1}{3,6 * (24 * (Nj - 1) * tj + Pj) - (24 - tj)} \quad (8)$$

donde:

i : subíndice número del consumidor; j : subíndice número de depósito regulador.

k : subíndice tipo de regulación.

Vik : volumen a regular por cada depósito regulador (10^3 m^3).

CQi : capacidad de diseño del tramo i del canal (m^3/s).

qsi : gasto de salida del depósito regulador i (m^3/s).

ti : horas de riego diarias al consumidor i .

Pi : periodo de riego en el consumidor i en días.

Ti : intervalo de riego en el consumidor i en días.

Ni : número de intervalos de riego en el consumidor i en que se riega continuamente.

Los datos y resultados (valores de volúmenes de los depósitos) de la corrida del modelo anterior con un software de Programación Lineal realizada por Marrero (1986), se muestran en las tablas 1 y 2.

La solución óptima obtenida por Marrero (1986), implicó que todos los depósitos eran de regulación en hiperintervalo (más allá del intervalo), pues nótese que en todos los depósitos se tienen componentes en la rama 3 ($Vi3$), es decir en el tramo de la regulación en el hiperintervalo. Esto se debe a las grandes demandas (gastos de salida qsi) hacia los sistemas de riego utilizadas en el modelo de optimización, comparadas con las capacidades de conducción del canal magistral. Obviamente en el valor de qsi , están incluidas todas las pérdidas desde los depósitos hasta los distritos de riego, incluyendo las internas en estos últimos.

Cuando el periodo de riego (Pi) coincide con el intervalo de riego (Ti), no hay regulación en el intervalo ($Vi2=0$), lo cual se evidencia en la inecuación (3), del grupo de restricciones de capacidad en los canales, en los cuales esto ocurre para los depósitos (1, 3, 4, 9, 10 y 11).

Tabla 1. Demandas y volúmenes de los depósitos reguladores del canal Pedroso–Güira

Consumidor	1	2	3	4	5	6
Nombre	Güira 1	Fajardo	La Chapa	19 de Abril	SDF-V-Nor	Mañalich
qs (m³/s)	7,35	1,306	0,88	0,74	4,21	0,665
t (h/día)	16	16	16	16	16	16
P (días)	6	13	10	6	13	13
T (días)	6	15	10	6	15	15
N (días)	14	6	9	14	6	6
Aj1	0,017361	0,017361	0,017361	0,017361	0,017361	0,017361
Aj2		0,00091374			0,00091374	0,0009743
Aj3	0,00013834	0,000132	0,000129	0,00013834	0,000132	0,000132
Vi1 (10³ m³)	141,12	25,075	16,894	14,216	80,832	12,768
Vi2 (10³ m³)		127,048			409,549	64,691
Vi3 (10³ m³)	35421,12	5715,473	4545,024	3566,208	18424,305	2910,25
CQ (m³/s)	10	10	10	12	12	12
L (km)	5,265	3	7	3	21	5

Tabla 2. Demandas y volúmenes de los depósitos reguladores del canal Pedroso–Güira (continuación)

Consumidor	7	8	9	10	11
Nombre	Sabana 2	Sabana 1	Rinconada	Soneira 2	Soneira 1
qs (m³/s)	0,576	0,576	1,05	1,905	2,595
t (h/día)	16	16	16	16	16
P (días)	13	13	6	6	6
T (días)	15	15	6	6	6
N (días)	6	6	14	14	14
Aj1	0,017361	0,017361	0,017361	0,01829	0,01829
Aj2	0,0009743	0,0009743			
Aj3	0,000132	0,000132	0,00013834	0,00014525	0,00014525
Vi1 (10³ m³)	11,056	11,056	20,16	36,576	49,824
Vi2 (10³ m³)	56,033	56,033			
Vi3 (10³ m³)	2520,76	2520,76	5060,16	9180,576	12505,824
CQ (m³/s)	12	12	12	15	15
L (km)	3,75	4,25	5	1	4

SITUACIÓN ACTUAL DEL SISTEMA CANAL PEDROSO–GÜIRA – DEPÓSITOS REGULADORES

Como ya fue mencionado en este trabajo, en el canal Pedroso–Güira fueron construidos cinco depósitos reguladores: Güira 1, Fajardo, 19 de abril, Rinconada y Villareal (este último actualmente está siendo usado como depósito compensador y no se considera en el proceso de

optimización), los cuales abastecen a varios consumidores. La geometría de todos estos depósitos consiste en una pirámide truncada con una base rectangular debiendo señalarse además que sus volúmenes no son iguales. Como fue mencionado, la capacidad del canal magistral es de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ y las pérdidas por filtración están en el orden del 50 % según mediciones realizadas por los explotadores del canal. Los volúmenes reales de cada uno de los depósitos reguladores se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Volúmenes de los depósitos reguladores del canal Pedroso–Güira

Depósitos Reguladores	Volumen (10^3 m^3)
Rinconada	22,565
19 de abril	15,886
Villareal	50
Fajardo	28,159
Güira 1	22,55

Ante esta problemática, Rodríguez Hernández (2011) propone reducir las pérdidas por filtración en el canal mediante la implantación de tecnologías geosintéticas, que tienen como principales ventajas: una alta eficiencia, una reducción en los costos de inversión, plazos más cortos de ejecución de las obras y facilidades para la aplicación. Resulta muy interesante también lo planteado por Barceló (2011) en cuanto a las medidas destinadas para aumentar la eficiencia de conducción y la evaluación económica que hace de las pérdidas de agua por ineficiencia en los canales y conductoras que opera el Grupo Empresarial de Aprovechamiento de Recursos hidráulicos (GEARH).

Optimización de los volúmenes reguladores en las condiciones actuales

El modelo matemático para los cuatro depósitos reguladores existentes - manteniendo tanto los datos de demanda obtenidos de las entidades agrícolas como el número de orden para cada uno utilizados por Marrero (1986) - queda formulado de la siguiente manera, donde la nomenclatura es la misma definida anteriormente.

Función objetivo:

$$\text{Min } Z = \sum \sum V_{ik} = V_{1,1} + V_{1,3} + V_{2,1} + V_{2,2} + V_{2,3} + V_{4,1} + V_{4,2} + V_{9,1} + V_{9,3} \quad (9)$$

Restricciones de volumen en los depósitos:

$$V_{1,1} \leq 141,12 \quad (10)$$

$$V_{1,3} \leq 35421,12 \quad (11)$$

$$V_{2,1} \leq 25,075 \quad (12)$$

$$V_{2,2} \leq 127,048 \quad (13)$$

$$V_{2,3} \leq 5715,473 \quad (14)$$

$$V_{4,1} \leq 14,216 \quad (15)$$

$$V_{4,3} \leq 3566,208 \quad (16)$$

$$V_{9,1} \leq 20,16 \quad (17)$$

$$V_{9,3} \leq 5060,13 \quad (18)$$

Nótese que el hecho de que P_i sea igual a T_i , como sucede con los consumidores Rinconada (No.1), 19 de abril (No.4) y Güira 1 (No. 9), (ver tabla 1 y tabla 2) hace que los límites superiores de las regulaciones en el intervalo y en el hiperintervalo coincidan, eliminándose una restricción por cada consumidor donde suceda esto.

Restricciones de capacidad en el canal:

$$0,017361 * V1,1 + 0,000138336 * V1,3 + 0,017361 * V2,1 + 0,000913743 * V2,2 + 0,000132 * V2,3 + 0,017361 * V4,1 + 0,000138336 * V4,3 + 0,017361 * V9,1 + 0,000138336 * V9,3 \geq 0.446 \quad (19)$$

El modelo matemático fue resuelto utilizando el módulo de optimización Solver, del Microsoft Office Excel. Los resultados del modelo matemático se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados de la optimización

Depósito	Valores optimizados (10^3 m^3)
Güira 1	6,42
Fajardo	6,42
19 de abril	6,42
Rinconada	6,42

Estos resultados de la corrida del modelo matemático demuestran que los cuatro depósitos utilizan la regulación diaria ya que en todos los casos los volúmenes óptimos son menores que V_{ik} . Estos valores óptimos son mucho menores que los volúmenes construídos correspondientes presentados en la tabla 3.

A continuación se presenta la tabla 5 donde se comparan los valores de los volúmenes optimizados con este modelo matemático actualizado y los obtenidos por Marrero (1986).

Tabla 5. Valores de los depósitos reguladores obtenidos de las corridas de optimización

Depósito	Valores optimizados actuales (10^3 m^3)	Valores optimizados (Marrero 1986) (10^3 m^3)
Güira 1	6,42	141,12
Fajardo	6,42	25,07
19 de abril	6,42	14,22
Rinconada	6,42	20,16

Nótese que la regulación requerida para la situación actual es diaria mientras que la obtenida por Marrero (1986) fue en todos los casos una regulación en hiperintervalo. La diferencia entre ambos modelos matemáticos se encuentra fundamentalmente en que no se construyeron todos los depósitos reguladores que se tenían previstos inicialmente y por tanto las demandas a lo largo del canal disminuyeron considerablemente.

Después de haber obtenido los volúmenes óptimos en la situación actual se procedió a calcular para los mismos los valores de las cargas, tirantes o alturas óptimas de agua en dichos depósitos a partir de la ecuación obtenida por Bosch (2013) y que se basa en el esquema de la figura 4.

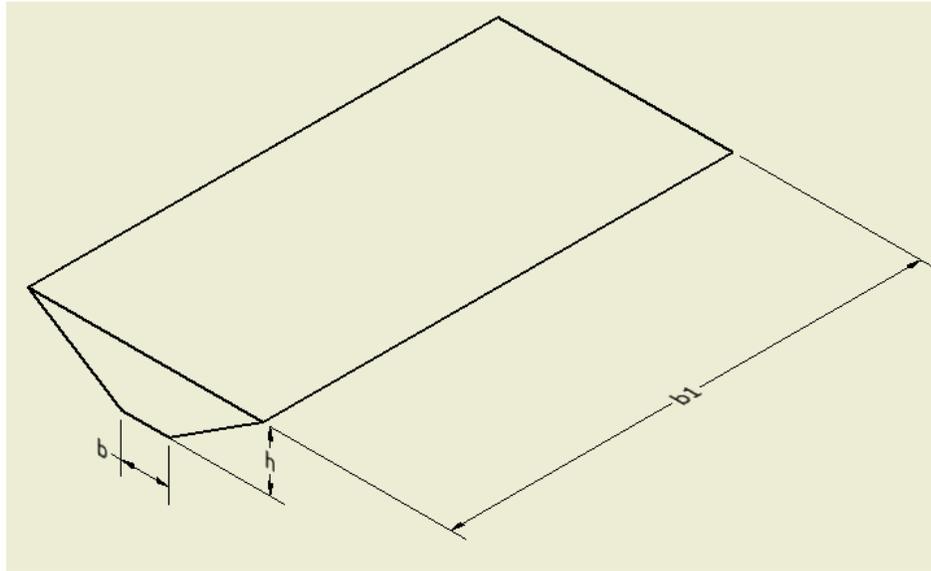


Figura 4. Pirámide truncada

$$V = f(bi, bi1, hi) \tag{20}$$

$$6,42 = bi * bi1 + hi^2 * bi1 + 3hi^3 + hi^{1.5} / 3 * \sqrt{3} * bi * \sqrt{bi1} + hi^{1.5} / 3 * \sqrt{3} * bi1 + 3 * hi^2 * \sqrt{bi} \sqrt{bi1} \tag{21}$$

donde:

- i*: número del depósito regulador (dato).
- bi*: ancho de la base de la pirámide truncada (m) para el depósito *i* (dato).
- bi1*: largo de la base de la pirámide truncada (m) para el depósito *i* (dato).
- h*: altura de agua en el depósito regulador *i* (valor a determinar).
- V*: volumen del depósito regulador (dato).

Los valores de los tirantes o alturas de agua optimizadas se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Valores de los tirantes optimizados para cada depósito regulador

Depósito Regulador	<i>b</i> (m)	<i>bi1</i> (m)	<i>h</i> (m)	<i>V</i> (10 ³ m ³)
Güira 1	110	120	0,46	6,42
Fajardo	73	153	0,54	6,42
19 de abril	90	150	0,45	6,42
Rinconada	48,2	200,7	0,62	6,42

Adecuación del modelo a las demandas actuales de los consumidores de la agricultura

Luego de haber hecho una búsqueda detallada, se obtuvieron las demandas que requieren los consumidores asociados al canal Pedroso–Güira como se muestran en las tablas 7, 8, 9 y 10.

Tabla 7. Demandas actuales de los consumidores asociados al depósito regulador Rinconada del canal Pedroso–Güira

Depósito regulador Rinconada	Trimestres (hm³/trimestre)			
Nombre	1	2	3	4
MINAGRI	4,74	3,821	3,059	5,627
CCS 17 de Octubre	0,882	0,642	0,642	0,882
UBPC Daniel P Amaro	0,254	0,299	0,299	0,254
MININT	0,196	0,196	0,196	0,196
UBPC Rolando P Quintero	0,401	0,2	0,2	0,401
Sumatoria	6,473	5,158	4,396	7,36
Q (m³/s)	1,92	1,66	1,41	2,37

Tabla 8. Demandas actuales de los consumidores asociados al depósito regulador 19 de Abril del canal Pedroso–Güira

Depósito regulador 19 de Abril	Trimestres (hm³/trimestre)			
Nombre	1	2	3	4
CCS Fructuoso Rodríguez	0,074	0,025	0	0,061
CCS Nicomedes Corvo (Quivicán)	0,377	0,499	0	0,503
IPA Fructuoso Rodríguez (Quivicán)	0,033	0,042	0	0,043
UBPC Manuel Isla (Quivicán)	0,067	0,106	0	0,105
Sumatoria	0,551	0,672	0	0,712
Q (m³/s)	0,16	0,20	0,00	0,21

Tabla 9. Demandas actuales de los consumidores asociados al depósito regulador Fajardo del canal Pedroso–Güira

Depósito regulador Fajardo	Trimestres (hm³/trimestre)			
Nombre	1	2	3	4
UBPC Manuel Fajardo (Quivicán)	0,342	0,292	0,104	0,37
Ministerio de las FAR	0,339	0,332	0	0,334
Rama MINFAR	0,339	0,332	0	0,334
Sumatoria	1,02	0,956	0,104	1,038
Q (m³/s)	0,30	0,28	0,03	0,31

Tabla 10. Demandas actuales de los consumidores asociados al depósito regulador Güira 1 del canal Pedroso–Güira

Depósito regulador Güira 1	Trimestres (hm ³ /trimestre)			
	1	2	3	4
Nombre				
Otras Provincias	2,816	2,275	0,054	3,192
Sumatoria	2,816	2,275	0,054	3,192
Q (m³/s)	0,84	0,68	0,02	0,95

A continuación se procedió a adaptar el modelo matemático a esta nueva condición, dando como resultado que para todos los casos la capacidad de conducción del canal (10 m³/s), es suficiente para abastecer a todos los consumidores, por tanto, con las demandas actuales, no se hubiese necesitado la construcción de depósitos reguladores, como se muestra en la tabla 11, donde los valores de las demandas en m³/s, a lo largo del año, son mucho menores que la capacidad de conducción del canal Pedroso Güira.

Tabla 11. Sumatoria de las demandas de los usuarios asociados al Canal Pedroso–Güira

Sumatoria Q (m ³ /s) en cada trimestre			
1	2	3	4
3,22	2,82	1,46	3,83

Análisis de resultados

Los resultados de la tabla 6 muestran los pequeños tirantes de agua en los depósitos reguladores lo cual indica que se pudieran haber construido obras de menores dimensiones en planta aunque lógicamente con tirantes mayores con el fin de garantizar los volúmenes óptimos obtenidos por Programación Lineal. Ello hubiera contribuido a un significativo ahorro de excavación, hormigón y tiempo en su construcción.

Los resultados de la tabla 7, 8, 9, 10 muestran que las demandas actuales de los consumidores asociados al canal Pedroso–Güira, se suplen con la capacidad de conducción del canal.

CONCLUSIONES

- Se ha comprobado cómo la utilización de las técnicas de optimización en el diseño de los depósitos reguladores del canal Pedroso–Güira, proporciona soluciones mucho más racionales al ponerse de manifiesto la posibilidad de resolver las demandas solicitadas con obras de menor envergadura.
- Es importante determinar de forma precisa las demandas de los usuarios asociados con los volúmenes de los depósitos reguladores.

RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo se recomienda a los proyectistas de obras hidráulicas, la utilización de técnicas de optimización para la elaboración de alternativas de solución que siempre darán resultados más económicos que los métodos convencionales. Esto es especialmente importante en la época que vive la humanidad donde la escasez de recursos, entre ellos uno natural tan vital como el agua, cada vez se hace más difícil captarla, conducirla, potabilizarla, consumirla y tratar sus residuales con una afectación mínima al medio ambiente.

REFERENCIAS

- Barceló J.** (2011). “Evaluación de las pérdidas de agua por ineficiencia en los canales y conductoras que opera el GEARH”, X Congreso Internacional de Ingeniería Hidráulica y VI Seminario Internacional del Uso Integral del Agua, Holguín, Cuba, 28 sept. - 1 oct.
- Bosch A.** (2013). “Deducción de fórmula para determinar la carga en un depósito regulador cuya forma geométrica es una pirámide truncada”, inédito, La Habana, Cuba.
- Estopiñán A. y Marrero N.** (1985). “Diseño óptimo de tanques compensadores para canales magistrales”, Revista Ingeniería Hidráulica, Vol. VI, No. 1, enero de 1985, CIH, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Ciudad de La Habana, Cuba.
- Marrero N.** (1985). “Técnicas de optimización aplicadas a la Ingeniería Hidráulica”, Editorial Ministerio de Educación Superior, Ciudad de La Habana, Cuba.
- Marrero N.** (1986). “La modelación matemática en la hidrología, el diseño y la operación de un sistema hidráulico”, Tesis de Doctorado, Facultad de Hidráulica y Viales, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Ciudad de la Habana, Cuba.
- Rodríguez Hernández L. O.** (2010). “Revestimiento de canales. Un paso necesario en el ahorro del agua”. II Convención Internac. de la Ingeniería en Cuba, Varadero, Matanzas, Junio 3 al 5.
- Rodríguez Hernández L. O.** (2011). “Implementación de política para el uso eficiente del agua con el empleo de tecnologías para la impermeabilización y revestimiento en las obras de conducción (canales)”. X Congreso Internacional de Ingeniería Hidráulica y VI Seminario Internacional del Uso Integral del Agua, Holguín, Cuba, 28 sept. - 1 oct.