MODELO DE DESPACHO ÓPTIMO DEL SISTEMA DE ACUEDUCTO DE LAS EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN E.S.P (EEPPM)

Juan C. Restrepo B, y Ricardo A. Smith Q.
Posgrado Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos
Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia,
Sede Medellín
rasmith@peeseus.unalmed.edu.co

RESUMEN

La operación de sistemas de acueducto complejos, como por ejemplo, aquellos que se encuentran interconectados y que poseen gran número de elementos (fuentes, sistemas de bombeo de agua cruda y tratada, embalses, plantas de potabilización, centrales de generación de energía, tanques de almacenamiento, etc), ha sido uno de los procesos que se han venido investigando en los últimos años, con el fin de hacer de ellos procesos óptimos desde el punto de vista de costos y de satisfacción de la demanda. En el presente trabajo se elaboró una propuesta de modelo de despacho óptimo para el sistema de acueducto de las Empresas Públicas de Medellín, teniendo en cuenta todas las restricciones de tipo físico, operativo, legal, etc. El modelo fue desarrollado en Programación Lineal Entera Mixta. Se desarrolló un modelo que tomó ventaja de las posibilidades operativas del sistema interconectado, y del cumplimiento estricto de las restricciones, y de esa manera, se obtuvo una propuesta operativa a menor costo que la operación real histórica, y siempre satisfaciendo la demanda. Dicho modelo es hoy en día una herramienta adicional que sirve de guía a la operación del sistema interconectado de acueducto de las Empresas Públicas de Medellín.

PALABRAS CLAVE: Optimización, Acueducto, Pogramación lineal, Despacho, Modelamiento

ABSTRACT

One of the processes that was in research during last years, with the aim to be optimized on both costs and demand fulfillment, has been the operation of complex water supply systems, i.e. those interconnected systems having numerous elements like sources, clean and raw water pumping stations and reservoirs, power generation plants, water treatment plants, etc. Within this work an optimum dispatch model proposal was designed for the Empresas Publicas de Medellin water supply system, taking into account all physical, operational and legal restrictions. The model was developed by Mixed Integer Linear Programming. The model made use of all operational posibilities of the interconnected system and also fulfilled strictly all restrictions, so that an operational proposal was obtained in which costs are lesser than real historic operational costs and there is always water demand compliance. Nowadays, said model became an additional tool, used as a guide for operation of the interconnected Empresas Publicas de Medellin water supply system.

KEY WORDS: Optimization, Water supply, Linear programming; Dispatch, Modeling

1. INTRODUCCIÓN

La empresa de acueducto de las Empresas Públicas de Medellín es la compañía encargada de prestar el servicio de suministro de acueducto en el Área Metropolitana de la ciudad de Medellín, compuesta por 9 municipios, entre ellos el municipio de Medellín, intentando abastecer un total de 700.000 usuarios del servicio aproximadamente. Se requiere que el Sistema de Acueducto Interconectado de las Empresas cuente con un modelo que optimice la operación del sistema, incluyendo en lo posible, todas las variables y restricciones que supone dicha operación. El esquema de operación actual no usa un procedimiento de optimización, lo que puede suponer que se estén dejando de lado posibles elementos que conduzcan a tomar decisiones que económicamente sean mejores para las Empresas. De esta manera, el objetivo que se pretende lograr con el presente trabajo es desarrollar un modelo que optimice la operación del despacho del sistema interconectado del acueducto, incluyendo todas las posibles variables y restricciones que de alguna manera estén relacionadas con la operación.

Debido a que, en términos generales, los sistemas de acueducto están compuestos en su primera fase por toda la infraestructura que va desde las captaciones hasta las plantas de potabilización, y en una segunda fase, por el conjunto de redes que van desde las plantas de potabilización hasta los tanques de almacenamiento (distribución primaria) y por el conjunto de redes por medio de las cuales se distribuye el agua a los usuarios finales (distribución secundaria), algunos autores han hecho esfuerzos por optimizar una u otra fase, y en algunos casos, optimizaciones parciales dentro de una fase; este es el caso de Coulbeck y Sterling (1978), Little y Mccrodden (1989), Ormsbee, Walski, Chase y Sharp (1989), Tarquin y Dowdy (1989), Brion y Mays (1991), Jowitt y Germanapolulos (1992), Crawley y Dandy (1993), y Ormsbee y Lansey (1994), los cuales identificaron como factor prioritario de optimización los costos relacionados con los bombeos, por el consumo de energía y por representar un alto porcentaje dentro de los costos totales de operación.

Para representar y resolver el problema, los autores han hecho uso de diferentes metodologías y herramientas de optimización, las cuales dependen de la forma como están interconectados los elementos del sistema, la dinámica misma de la red, las simplificaciones aceptadas y la habilidad del modelador, y entre las cuales se encuentran los multiplicadores de Lagrange (Coulbeck y Sterling, 1978, Brion y Mays, 1991), programación lineal y lineal entera mixta (Little y Mccrodden, 1989, Jowitt y Germanapoulos, 1992, Crawley y Dandy, 1993), programación dinámica (Ormsbee, Walski, Chase y Sharp, 1989), programación dinámica con optimalidad progresiva (Zessler y Shamir, 1989).

Independiente de la herramienta utilizada, para la mayoría de los autores referenciados, los costos de energía tanto por consumo como por demanda (máxima potencia instantánea consumida), constituían el rubro más representativo de la función objetivo; complementando lo anterior, cada autor incluía los factores de costo que hacían parte de la operación del sistema que estaban modelando y que consideraban importante.

Al revisar los resultados de las aplicaciones de los modelos desarrollados por los distintos autores a sistemas reales, se detectó que la optimización matemática hacía uso de todas las posibilidades operativas que brindaban los sistemas, y que aparentemente eran tenidas en cuenta en la operación empírica pero de una forma muy conceptual, lo que no permitía operar óptimamente; de ahí que los resultados mostraban como operaciones modeladas alcanzaban entre un 3% (Coulbeck, y Sterling, Doncaster Eastern y Thorne , USA, 1978), hasta un 22% (Little y Mccrodden, Raleight, 1989) de ahorro en costos frente a operaciones históricas.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ACUEDUCTO DE EEPPM Y FORMULACIÓN CONCEPTUAL DEL PROBLEMA

En las Figura 1 y 2 se presenta un esquema general de los componentes del sistema de acueducto y su interconexión, los cuales se irán describiendo junto con sus limitaciones operativas.

- Existen 3 subsistemas mayores conocidos como La Ayurá, Manantiales y Piedras Blancas, con 4 plantas de potabilización y 3 embalses, y 2 subsistemas menores, cada uno con su planta de potabilización, pero con captaciones directas; tanto los subsistemas mayores como menores poseen puntos de interconexión, según como se muestra en la Figura 2,

permiten que a un usuario se le pueda suministrar agua desde diferentes fuentes del sistema.

- El subsistema La Ayurá posee 2 bombeos de agua cruda en serie, el primero en el Río Piedras y el segundo en el Río Pantanillo, tiene además el embalse de agua la Fe con sus fuentes propias, la Central de Generación Hidroeléctrica, la planta de potabilización Ayurá, y demandas exclusivas y compartidas con otros subsistemas. El bombeo del Río Piedras posee tres grupos de bombas que funcionan en paralelo mientras que el bombeo del Río Pantanillo posee dos subestaciones de bombeo independientes, compuestas por 2 y 3 grupos de bombas respectivamente que funcionan en paralelo en la subestación correspondiente.
- El subsistema Manantiales cuenta con el embalse de agua Río Grande II con sus fuentes propias, la Central de Generación Hidroeléctrica, la planta de potabilización Manantiales, y demandas exclusivas y compartidas con otros subsistemas.
- El subsistema Piedras Blancas hace uso actualmente del bombeo de agua cruda en las Quebradas la Honda, el embalse de Piedras Blancas, la Central de Generación Hidroeléctrica, la planta de potabilización Villahermosa, y demandas exclusivas y compartidas con otros subsistemas; el bombeo de la Honda está compuesto por 2 subestaciones de bombeo independientes conformadas por 4 y 3 grupos de bombas respectivamente, los cuales operan en paralelo en la subestación correspondiente.

Al recorrer el sistema y su operación, la formulación detallada y conceptual del problema sería como sigue:

El sistema posee 3 embalses de agua cruda, dos de los cuales, además de abastecerse de fuentes propias complementan los requerimientos con sistemas de bombeo. Cada bombeo posee características propias, que impiden tratarlos por medio de formulaciones generales, haciendo necesario que sean formulados independientemente. En esta fase del problema, el modelo debe tratar de minimizar costos de operación de los bombeos de agua cruda, siempre y cuando se satisfagan los requerimientos de demanda de agua.

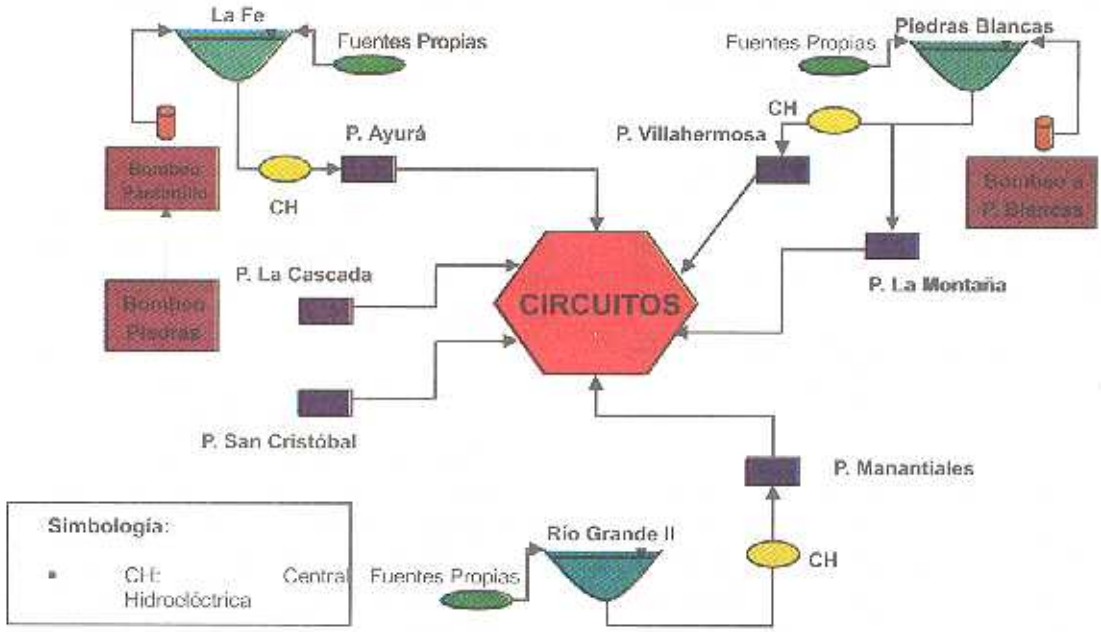

FIGURA 1. Configuración general del Sistema de Acueducto de las Empresas Públicas de Medellín.

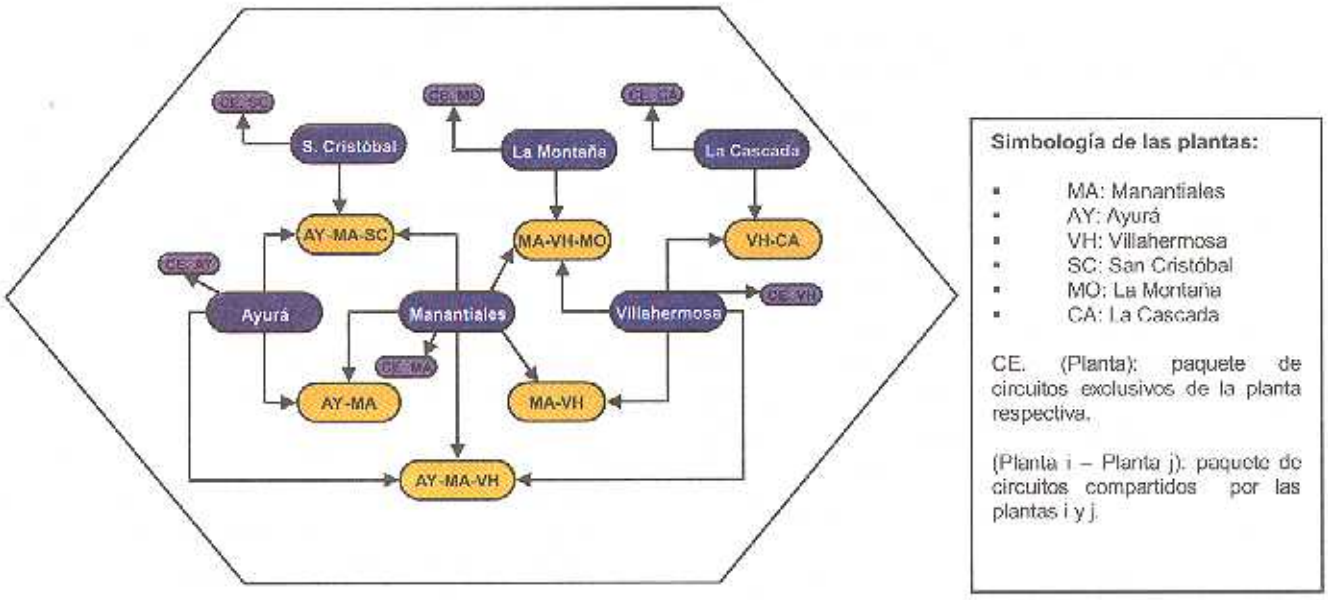

FIGURA 2. Configuración general de la interconexión del Sistema de Acueducto de las Empresas Públicas de Medellín..

Tanto la estructura tarifaria para el pago de la energía consumida en los bombeos, la cual está basada en costos diferenciales por franjas horarias, como las capacidades de las diferentes combinaciones de las bombas, deben ser optimizadas para obtener menores costos de operación.

Como ya se anotó, los tres embalses tienen fuentes propias de abastecimiento cuyas hidrologías constituyen datos en las ecuaciones de balance de masas de los mismos. El modelo de optimización va a dar como resultado adicional, la regla de operación de los embalses a mediano plazo.

Una buena operación debe tratar además, minimizar los vertimientos de los embalses ya que se entiende como agua que se perdería.

En la operación de los embalses hay ciertos niveles esperados que se desearían tener al inicio de las estaciones de verano, o al final de un período de operación; de esta manera, para reflejar tal situación, el modelo debe tratar de proponer una operación que mantenga los embalses alrededor de dichos niveles esperados.

Como elemento novedoso el modelo tiene en cuenta la variable de la evaporación en los embalses, entendiendo el volumen evaporado dentro de un período es función del espejo de agua del embalse, que a su vez es función del volumen almacenado e el mismo. Se trataría de minimizar los volúmenes evaporados por el embalse ya que se considera que es agua perdida.

El agua que pasa de los embalses a las plantas de potabilización genera energía en las centrales hidroeléctricas ubicada en ese recorrido, lo cual redunda en beneficios económicos que dependen de la eficiencia de las centrales, que el modelo aprovecha para optimizar en la operación.

En el momento en que el aporte de las fuentes naturales y de bombeo a los embalses, no sea suficiente para abastecer las demandas se producen estados de racionamientos a altos costos, y que deben ser representados por una variable de volumen no entregado. El modelo intentará realizar la operación del sistema, aprovechando la interconexión del mismo, para que los racionamientos sean mínimos o nulos.

La potabilización del agua que llega a las plantas tiene unos costos diferenciales entre las mismas, adicionales a los costos fijos, debido a la diferente calidad de las fuentes

de abastecimiento del sistema, lo que redunda en un uso más o menos intensivo de los químicos requeridos para tratarla. El modelo debe proponer una operación que minimice los costos de potabilización, basado en el volumen que entregue a cada planta.

El agua en las redes de distribución, en algunos casos muy particulares, puede llegar a un tanque por bombeo o por gravedad, desde una planta u otra. Dependiendo de todos los costos de la ruta completa, incluyendo bombeos de agua tratada, el modelo debe determinar la ruta óptima, es decir , la de menor costo, para suministrar el agua desde una fuente a los clientes.

A grandes rasgos, con los conceptos descritos, queda planteado el problema por resolver, dirigido específicamente a minimizar los costos de operación de agua cruda, y de la participación de las plantas en el abastecimiento de los circuitos compartidos.

3. REPRESENTACIÓN MATEMÁTICA DEL MODELO

Con el fin de ir de la mano con el proceso operativo del sistema en cuanto a la representación matemática del modelo, a continuación se describirán las funciones de costo, factores a optimizar y restricciones asociadas, a cada uno de los componentes físicos del sistema, teniendo en cuenta que aquellas restricciones que involucran varias variables serán descritas posteriormente.

3.1. ESTACIONES DE BOMBEO

3.1.1 Costo de la energía consumida al bombear agua cruda a los embalses

Como ya se mencionó antes, cada una de las estaciones de bombeo puede impulsar agua por varias combinaciones de bombas, las cuales tienen eficiencias diferentes; de igual forma, la estructura tarifaria para el pago de la energía consumida en los bombeos es diferencial por franjas horarias; después de revisar varias formas de evaluar los costos por energía consumida en los bombeos, se optó por la que a continuación se describe, teniendo en cuenta como premisas: a) la cantidad mínima de horas reales que deben permanecer encendidas las bombas de las diferentes estaciones de bombeo, lo que modificaría y replantearía las franjas de la estructura tarifaria, b) el que a una hora específica el modelo debería identificar cual sería la combinación de bombas a operar en cada estación de bombeo en forma excluyente, es decir, sin permitir que a esa misma hora se operaran otras combinaciones de bombas diferentes dentro de la misma estación de bombeo, c) el que para cada una de las combinaciones de bombas de cada estación de bombeo estarían preestablecidos sus caudales de trabajo por cada franja de operación, d) el que se podría aprovechar el ciclo de repetición semanal por ser un modelo a mediano plazo, lo que supone que el modelo define la forma de operar las bombas en una semana y así se debe proceder para el resto del mes, e) y el que se debería minimizar la dimensionalidad del modelo sin sacrificar el objetivo; cabe anotar que cuando se habla de combinación de bombas dentro de una estación de bombeo, se refiere explícitamente ***al tamaño*** de la combinación de bombas, es decir, ***a la cantidad*** de bombas que deben operarse, ***y no a cuáles*** bombas operar específicamente.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, el concepto de "franjas de operación" se definió como aquellos rangos de tiempo que componen cada uno de los días del período de operación t, en los cuales las tarifas de cobro de energía son constantes, entendiendo que la franja del día lunes que va desde las 0:00 a las 3:00 am es distinta a la franja del día martes que va desde las 0:00 a las 3:00 am, así las tarifas de energía sean iguales.

Con las consideraciones anteriores se calculan entonces los costos de la energía consumida en cada uno de los bombeos de agua cruda. Este costo es función de los cargos regulados y no regulados del consumo de energía por cada franja de operación del bombeo (datos), el volumen bombeado por cada tamaño de combinación de bombas, en cada franja de operación (dato), una variable de tipo on-off (0 o 1) que identifica la combinación de bombas a operar, el factor de eficiencia de cada tamaño de combinación de bombas (dato) y una constante que representa el ciclo de repetición semanal, ya que el modelo propone una operación de bombas para una semana y dicha propuesta se debe repetir en las 3 semanas subsiguientes, para un total de 28 días.

3.1.2 Restricción de exclusividad en la operación de combinaciones de bombas de tamaño i de una misma estación de bombeo.

Debido a que en una misma franja de operación no se pueden operar simultáneamente dos o más combinaciones de bombas de cualquier tamaño de una misma estación

de bombeo, es necesario establecer una restricción que implique que sólo pueda operarse a lo máximo un solo tamaño de combinación de bombas, en dicha franja de operación, dejando la posibilidad de que no haya necesidad de que ninguna de las combinaciones de la estación de bombeo tenga que estar operando.

3.1.3 Costo total de mantenimiento bombas de agua cruda, según el número de horas de operación, durante el horizonte de planificación.

Cada una bombas tiene establecida una cantidad máxima de horas a las cuales se les hace mantenimiento tipo "over hold", lo que significa que es dependiente de la operación del sistema, y por cada hora de operación ya irá acumulando una proporción del costo total de mantenimiento. Dichos costo deben ser minimizado.

De esta manera, la expresión que representa los costos de mantenimiento de todos los grupos de bombas durante el período de planificación es función del número de mantenimientos requeridos para cada grupo de bombas, en el horizonte de planificación (variable) y el costo unitario de dicho mantenimiento (dato).

3.1.4 Restricción de equivalencia entre el número total de mantenimientos de un grupo de bombas y el número de horas de operación.

Para calcular el número de mantenimientos que deberán ser realizados a un grupo de bombas, es necesario encontrar el número total de horas que deberá ser operado dicho grupo, durante el horizonte de planificación.

Cabe recordar nuevamente que el modelo no está indicando ***cuáles*** bombas operar en determinado momento sino ***cuántas***, es decir, la cantidad. Una vez evaluado el valor del número total de horas, el modelo pasa a calcular el número de mantenimientos que requiere el grupo de bombas durante el horizonte de planificación, lo cual es función del número total de horas de operación de dicho grupo de bombas, previamente calculado (variable) y el número total de horas establecido, a las cuales se realiza el mantenimiento al grupo (dato).

3.1.5 Restricción del agua que es bombeable desde una fuente, de acuerdo con la capacidad de la última.

Debido a que las fuentes desde las cuales se bombea agua no pueden quedar "secas" se asumirá que no se podrá bombear más del 50% del volumen de agua disponible para ser bombeado, y por lo tanto se establecerá una restricción en tal sentido. Este parámetro puede ser modificado según las preferencias del decisor o las reglamentaciones que se tengan al respecto.

3.2 EMBALSES

3.2.1 Costo de los volúmenes de déficit o beneficio de los volúmenes almacenados en exceso en cada embalse.

Como se anotó antes, en la operación de los embalses hay ciertos niveles esperados que se desearían tener al inicio de las estaciones de verano, o al final de un período de operación; de esta manera, para reflejar tal situación, el modelo debe tratar de proponer una operación que mantenga los embalses alrededor de dichos niveles esperados.

Cuando se logra estar por encima de dicho nivel se considera que se ha superado la meta y se le carga una recompensa (beneficio), mientras que si se queda por debajo de dicho nivel, se genera un "castigo" representado por un costo operativo intangible; se dice intangible porque sólo se limita a representar las preferencias del decisor y no genera desembolso físico de dinero, pero debe ser tal que direccione la operación propuesta por el modelo al cumplimento del objetivo.

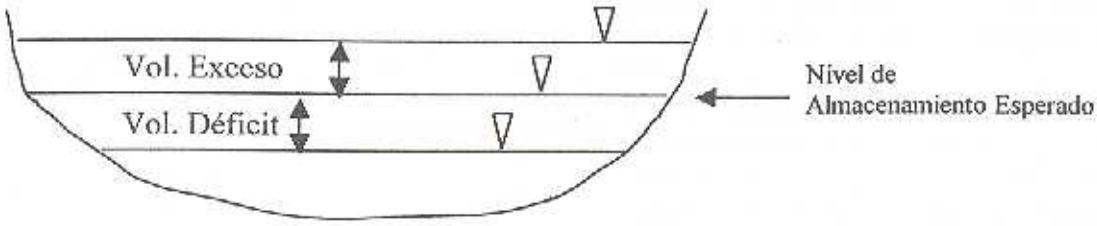

FIGURA 3. Esquema del volumen esperado en un embalse vs volumen de déficit o volumen almacenado en exceso.

Dependiendo de las preferencias del decisor, en algunos casos el volumen mínimo de un embalses puede tomar el valor del volumen esperado, o viceversa, se puede esperar que el embalse no baje de su volumen mínimo. Así, los costos por déficit y los beneficios por exceso son función del volumen final del embalse (variable), el volumen esperado (dato) y el costo o beneficio unitario asignado al resultado.

3.2.2. Restricciones de niveles de embalses.

Se entiende que el volumen del embalse en ningún caso debe superar las restricciones de tipo físico en cuanto a la capacidad del mismo se refiere, tanto por encima (volumen máximo) como por debajo (volumen mínimo).

3.2.3. Costo de los volúmenes de vertimiento en el horizonte de planificación.

Según el comportamiento tanto de la demanda como de la hidrología, pueden darse el caso de que el aporte neto al embalse supere la capacidad del mismo, lo que implica que se requiera verter el agua de exceso. Lo ideal en la operación de un embalse es evitar los vertimientos, ya que en algunos casos es resultado de bombeos innecesarios. Además, es necesario incluir la variable vertimiento en la restricción del balance de masas de los embalses para obtener soluciones factibles, en caso de que se puedan llegar a presentar; por otra parte, el costo unitario intangible que se le asigne debe ser tal que represente la preferencia del decisor, en el sentido de que los vertimientos no son bien vistos, si pudieron ser controlados previamente. Dichos costos son función del volumen vertido (variable), y del costo unitario asignado al vertimiento.

3.2.4. Restricción de capacidad de los vertederos de cada uno de los embalses

El hecho de que los embalses puedan verter agua no significa que lo puedan hacer en cualquier magnitud, estos no pueden superar la capacidad de las estructuras por las cuales se vierte, y es necesario enonces plantear una expresión que represente dicha restricción.

3.2.5. Costo de los volúmenes de evaporación

La cantidad de la evaporación de agua en los embalses depende exclusivamente de la tasa de evaporación de la zona y del almacenamiento en el embalse, ya que este último influye directamente en la magnitud del espejo de agua. Por lo anterior se deduce que dependiendo como se opere el sistema, el embalse tendrá un mayor o menor espejo de agua, y la operación debe evitar "perder" agua por evaporación. La relación almacenamiento – espejo de agua se determina utilizando la curva área – elevación – capacidad del embalse. A dicha variable se le carga un costo ficticio que debe ser optimizado.

La expresión que representa dichos costos se limita a incluir lo relacionado con el volumen de agua evaporada que depende del almacenamiento en el embalse, y es función de dicho volumen evaporado (variable) y el costo unitario ficticio asignado a dicha evaporación (dato).

3.3. PLANTAS DE POTABILIZACIÓN

3.3.1. Costo de potabilización del agua cruda en las plantas

El agua requiere un tratamiento que es realizado en las plantas de potabilización, las cuales tienen procesos con eficiencias distintas, reciben aguas de fuentes con diferente calidad de agua, y por lo tanto los costos de potabilización son diferenciales entre las plantas. Para cada planta existe un costo promedio de potabilización por m^3 de agua. Dichos costos deben ser optimizados, de acuerdo con la forma como participen las plantas de potabilización en el abastecimiento de circuitos compartidos. Las plantas además de entregar agua a los tanques, consume agua para efectos de los procesos internos de potabilización, y dicho consumo es función del volumen entregado por la misma, lo cual se representa por medio de un porcentaje que se aplica al volumen entregado, y es diferente para cada planta. Se asumen los siguientes valores para ese porcentaje, teniendo en cuenta un factor de seguridad:

- Planta Ayurá: 1,5%
- Planta Villahermosa: 3,0%
- Planta La Montaña: 1,0%
- Planta Manantiales: 4,0%
- Planta La Cascada: 1,0%
- Planta San Cristóbal: 2,0%

Existe otro concepto adicional que debe ser tenido en cuenta a la hora de calcular el volumen que un embalse debe entregar a sus plantas de potabilización correspondientes; este concepto es el que está relacionado con las "pérdidas" de agua que se presentan en el

transporte de la misma desde las plantas hasta los tanques de almacenamiento, y que equivale a un volumen que es también función del agua entregada por parte de los embalses a las plantas. Dicho porcentaje es aproximadamente el 5% del volumen entregado a las plantas, incluyendo un factor de seguridad; al sumarse este último con el que corresponde al volumen consumido por las plantas, se puede definir un único porcentaje *pvad* que represente ambos volúmenes adicionales que deben ser entregados por los embalses. El incremento correspondiente a las pérdidas sólo debe ser aplicado a las plantas Ayurá, Villahermosa y Manantiales, ya que las demás poseen el tanque principal en el mismo sitio de la planta.

En la expresión que representa dichos costos se incluyen tanto las plantas que son abastecidas desde embalses como las que lo son desde captaciones directas, siendo dichos costos función del volumen que es entregado a la planta desde el embalse (variable), el porcentaje que representa las pérdidas y el consumo propio (dato) y el costo unitario de potabilización de agua en la planta correspondiente (dato).

3.3.2. Restricción de capacidad de tratamiento en las plantas de potabilización

El volumen que es tratado en cada una de las plantas de potabilización de agua, no puede llegar a superar la capacidad que tienen dichas plantas.

3.3.3. Costo de racionamiento

Puede darse el caso de que no pueda ser posible satisfacer la demanda en un momento determinado, lo que hace necesario racionar y como consecuencia, costear la insatisfacción de la demanda. El costo de racionamiento debe ser tal que el modelo tienda a evitar los racionamientos, siempre y cuando tenga como abastecer la demanda, así sea haciendo uso de bombeos y rebombeos durante todo el período de tiempo, si la fuente aportante lo permite.

Dichos costos son función del volumen a racionar (variable) y el costo unitario asignado a dicho racionamiento (dato).

3.3.4. Beneficios recibidos por la venta de energía generada

La energía generada en las microcentrales de las plantas de potabilización se comercializa en el sector eléctrico colombiano. El modelo debe entonces maximizar los beneficios que se puedan generar por este concepto. La estructura tarifaria no marca diferencias de precios entre los kW-h generados por una microcentral o por otra, y además es un precio que no es diferencial por franjas horarias. Cabe anotar que cada una de las microcentrales posee una eficiencia diferente que debe ser aprovechada por el modelo, además de que se asume que toda el agua que pasa a ser tratada a la planta, pasa por la microcentral y genera energía. Estas microcentrales existen en las plantas de potabilización de aguas de Ayurá, Manantiales y Piedras Blancas.

El beneficio obtenido por generar energía es función del volumen de agua entregado a la planta desde el embalses (variable), el factor de eficiencia de la microcentral (dato) y el beneficio unitario asignado al kilowatio – hora generado (dato).

3.4. REDES DE DISTRIBUCIÓN

3.4.1. Costos por abastecimiento de circuitos compartidos

Dentro de la configuración del sistema existen grupos de circuitos que pueden ser abastecidos por gravedad o mediante bombeos de agua tratada, desde plantas de potabilización diferentes. Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario que el modelo proponga la ruta de menor costo para abastecer un circuito de este tipo, que no necesariamente es por gravedad, ya que la ruta considera todos los costos agua arriba como son la potabilización, la generación de energía, los bombeos de agua tratada, etc. La variable en la función de costos por abastecimiento de un determinado subconjunto de circuitos compartidos y que son alimentados por bombeo, está representada por el porcentaje de participación de cada una las plantas en la demanda de dicho subconjunto, en cada uno de los períodos de tiempo del horizonte de planificación. De ahí que la decisión que adoptará el modelo está relacionada directamente con dicho porcentaje de participación teniendo en cuenta, entre otras, la capacidad de las plantas de potabilización.

La expresión general que representa dichos costos es función del volumen demandado por el grupo de circuitos analizados (dato), la participación asignada por el modelo a cada planta para abastecer dichos grupos de circuitos compartidos (variable) y el costo de bombeo de agua tratada unitario para cada grupo de circuito.

3.4.2. Restricción para la participación de las plantas de potabilización en el abastecimiento de un circuito compartido

Cada uno de los subconjuntos de circuitos compartidos, sean o no alimentados por bombeo, debe ser abastecido teóricamente en forma total y agregada, por las plantas de potabilización que tienen la posibilidad de hacer un aporte en el abastecimiento de dicho subconjunto, por lo que la sumatoria de dicha participación debe ser igual a 1. Sin embargo, la posibilidad de presencia de un racionamiento hace suponer que la demanda de un circuito compartido pueda no ser satisfecha, a pesar de que la sumatoria de las participaciones agregadas siga siendo igual a 1, ya que el racionamiento está representado por una variable sin que esto signifique que haya que disminuir numéricamente lo demandado por los circuitos.

3.4.3. Restricción de volúmenes límites para cada planta

El hecho de que una planta pueda abastecer a un circuito compartido, no significa que lo pueda hacer en su totalidad, lo que supone que haya que limitar dicha participación por medio de un porcentaje máximo. Lo anterior se puede deber a incapacidades de tipo hidráulico, o por incapacidades de las plantas de potabilización. Como consecuencia de lo anterior, si una planta tiene limitaciones para abastecer un circuito compartido entonces otra debe como mínimo superar tal limitante, y por ende se le debe establecer una participación mínima.

3.5. RESTRICCIONES QUE COMBINAN DIFERENTES VARIABLES

3.5.1. Restricciones de balance de masas en los embalses

En cada embalse, en cada período de tiempo se debe respetar el balance de masas o ecuación de continuidad, teniendo en cuenta como volúmenes entrantes al embalse el aportado por las fuentes directas del embalse (dato), el aportado por las estaciones de bombeo directo al embalse (variable), y como volúmenes salientes el volumen vertido (variable), el volumen evaporado (dato y variable) y el volumen entregado a la planta de potabilización.

3.5.2. Restricciones de balance de masas en las plantas de potabilización

De igual como se da en el caso de los embalses, en las plantas de potabilización, las entradas y salidas deben estar balanceadas. En la Figura 4 se presentan esquemáticamente los insumos positivos y negativos de una planta:

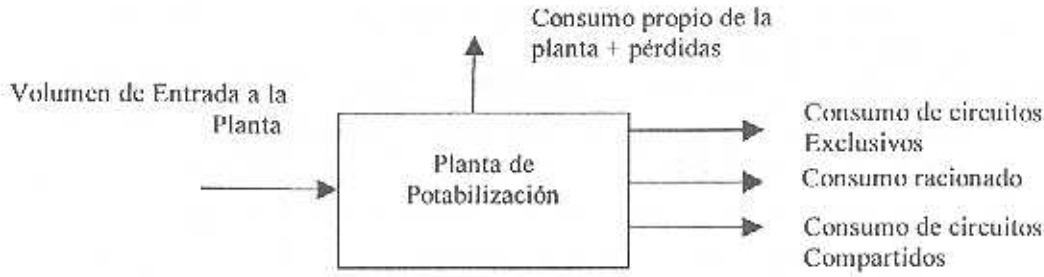

FIGURA 4. Representación de los insumos positivos y negativos de una planta de potabilización.

3.6. FUNCIÓN OBJETIVO

La función objetivo a minimizar utilizada por el modelo tiene entonces en cuenta los siguientes costos:

- Costos de consumo de energía por bombeos de agua cruda.
- Costos de mantenimiento de grupos de bombas.
- Costos (o beneficios) de desviación del almacenamiento deseado.
- Costos de los volúmenes de vertimiento.
- Costos de los volúmenes evaporados en los embalses.
- Costos de racionamiento.
- Costos de potabilización de agua cruda.
- Costos de abastecimiento de circuitos compartidos.

Igualmente considera el beneficio por generación de energía en las microcentrales de las plantas, asumido como un término con signo negativo en la función objetivo.

Esta función objetivo y las restricciones anteriores le dan forma final al modelo de optimización que permite determinar la operación del sistema de abastecimiento de agua potable de Empresas Públicas de Medellín a mínimo costo.

4.APLICACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

4.1. PRUEBAS PREVIAS DEL MODELO

Antes de realizar la aplicación y validación del modelo frente a la operación histórica, se hizo necesario probar el modelo con el fin de asegurar que la configuración del mismo era la correcta y poder verificar que los resultados sí coincidieran, más que numéricamente, global y conceptualmente, con los resultados esperados. Se realizaron pruebas al modelo descompuesto en "submodelos", susceptibles de ser optimizados, y que se iban agregando hasta conformar el modelo global o general. Esta forma de hacerle pruebas a modelos de gran tamaño fue de alto valor para el logro del objetivo.

4.2. VALIDACIÓN DEL MODELO

Los períodos escogidos para realizar la comparación fueron FEBRERO-MARZO-ABRIL 1998 (Período NIÑO) y FEBRERO-MARZO-ABRIL 2000 (Período NIÑA). Los datos de costos se tomarán los mismos para ambos períodos, y son los que corresponden a FEBRERO-MARZO-ABRIL de 2000, con el fin de trabajar con costos a valor presente y constante de ese momento. El modelo construido en Programación Lineal fue corrido en el software CPLEX, que brindó todas las posibilidades para el logro del objetivo.

A pesar de que se realizaron diversas pruebas, sólo serán presentadas aquellas en las cuales el modelo se corrió en condiciones más cercanas a la operación real, y así poder hacer comparaciones más consistentes. Cuando se dice que el modelo se corrió en condiciones más cercanas a la operación real, es porque se asumieron como embalses mínimos del modelo, los embalses mínimos que se presentaron en la realidad, además de que se optó por NO valorar los volúmenes en exceso o defecto en los embalses. A continuación se presentan en las Tablas 1 y 2 los resultados de las comparaciones de ambos períodos NIÑO y NIÑA, con los correspondientes comentarios. En esas tablas y en el texto a continuación, OR representa la operación real y OM la operación propuesta por el modelo.

TABLA 1. Costos totales de los diferentes conceptos de OR vs OM, para el período FEBRERO MARZO-ABRIL de 1998.

CONCEPTO	TOTAL Volumen Miles m^3	TOTAL Costo Miles $
	OM / OR	OM / OR
Volumen Bombeos Agua Cruda	73%	77%
Horas Operación Bombas y costos por mantenimiento	75%	80%
Volumen Potabilización	103%	109%
Volumen Generación Energía	100%	-94%
COSTOS TOTALES OPERACIÓN REAL		1.191.522
COSTOS TOTALES OPERACIÓN MODELADA		908.663
TOTAL		76%

TABLA 2. Costos totales de los diferentes conceptos de OR vs OM, para el período FEBRERO-MARZO-ABRIL de 2000.

CONCEPTO	TOTAL Volumen Miles m³	TOTAL Costo Miles $
	OM / OR	OM / OR
Volumen Bombeos Agua Cruda	250%	303%
Horas Operación Bombas y costos por mantenimiento	221%	262%
Volumen Potabilización	104%	97%
Volumen Generación Energía	107%	-117%
COSTOS TOTALES OPERACION REAL		-596.803
COSTOS TOTALES OPERACION MODELADA		-644.539
TOTAL		108%

4.2.1. Análisis de los resultados de la comparación en el período NIÑO - 1998

- Los volúmenes bombeados y sus costos son mucho menores en la OM que en la OR, 73% (volumen) y 77% (costos) de los valores de la OR, lo que demuestra que los operadores siguen siendo conservadores con el fin de sortear la incertidumbre de la información proyectada, además de que el modelo hizo uso de la condición de embalses mínimos establecidos. Los resultados no están en la misma proporción ya que 1 m³ de agua, para efectos de volumen, es igual para todas estaciones de bombeo, mientras que el costo de bombeo de ese mismo m³ es diferencial por estación y por franja de operación.
- Algo similar sucede con los mantenimientos de las bombas. Cabe anotar que los costos de mantenimiento, funcionan como costos de depreciación que la OM tiene en cuenta, mientras la OR no, porque en esta última, el mantenimiento sólo cuesta en el momento en que hay que hacerlo.
- El 3% de más tratado por las plantas en la OM se debió al porcentaje de pérdidas y de consumo propio asumido, el cual fue diferente de lo que se dio en la realidad. Sin embargo el que el porcentaje sea cercano a 100% es una muestra de que ambas, la OR y la OM, están operando para satisfacer la demanda. Los costos no están en la misma proporción de los volúmenes ya que las plantas tienen costos de potabilización diferenciales.
- El volumen entregado a las plantas por parte de los embalses, el cual es el que genera energía en las microcentrales, muestra como es similar (100%) en ambas operaciones, la OR y la OM, ya que dichos resultados son dependientes directamente de la demanda. Los beneficios alcanzados por la venta de energía en la OM alcanzaron a ser el 94% de los obtenidos en la OR, lo cual se debió a la optimización global del sistema.
- Al agregar los costos de cada uno de los conceptos, se obtuvo una OM que costó el 76% de lo que costó la OR; dichos ahorros potenciales (24%) de la OM con respecto a la OR están concentrados en la disminución de los bombeos de agua cruda.

4.2.2. Análisis de los resultados de la comparación en el período NIÑA - 2000

- Para el caso de los volúmenes bombeados y sus costos, ambos son mucho mayores en la OM que en la OR, 250% (volumen) y 303% (costos) de los valores de la OR; estos resultados no deben ser analizados en forma particular, ya que, como ya se ha explicado ampliamente, el modelo considera la interrelación de todos los factores de costo y beneficio para definir una operación óptima, y eso se demuestra en este período NIÑA, donde la OR ***total*** resulta en menos beneficios que la OM total. La diferencia se debe básicamente a que los volúmenes bombeados por la OM fueron mayores que la OR, pero en valores

muy pequeños que no fueron determinantes en los costos totales. La misma conclusión aplica a los costos y horas de mantenimiento.

- El 4% de más tratado por las plantas en la OM se debió al porcentaje de pérdidas y de consumo propio asumido, el cual fue diferente de lo que se dio en la realidad. Sin embargo el que el porcentaje sea cercano a 100% es una muestra de que ambas, la OR y la OM, están operando para satisfacer la demanda. Los costos no están en la misma proporción de los volúmenes ya que las plantas tienen costos de potabilización diferenciales.
- El volumen entregado a las plantas muestra como la OM generó más energía que la OR, debido al mayor volumen tratado en las plantas. Los beneficios alcanzados por la venta de energía en la OM alcanzaron a ser el 17% más (117%) de los obtenidos en la OR, lo cual se debió a la optimización global del sistema.
- Al agregar los costos de cada uno de los conceptos, se obtuvo una OM que obtuvo un 8% más de beneficios (108%) que la OR; dichos beneficios potenciales (8%) de la OM con respecto a la OM están concentrados en haber aprovechado de mejor forma el rendimiento diferencial de las centrales de generación.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Respecto al planteamiento general del modelo se tienen las siguientes conclusiones:

- El modelo incluye algunos elementos novedosos que no son tenidos en cuenta en la operación real como por ejemplo, la valoración de los almacenamientos en exceso o por defecto, la valoración del agua evaporada, la valoración de los racionamientos, etc, y que no deben ser descartados por el operador.
- El modelo incluye en forma explícita y no sólo de manera conceptual, todos los factores de costo y la interdependencia entre ellos, que deben ser tenidos en cuenta al definir la operación; esto no sucede en la OR.
- El modelo establece reglas de operación algo estrictas con el fin de poder conseguir los costos mínimos óptimos, pero es posible que en la práctica no puedan ser fácilmente implementadas, debido por ejemplo a los intercambios consecutivos de encendidos de bombas, etc, prácticas no muy comunes dentro de la operación. Es por ello que el modelo a futuro, con un mayor conocimiento de la realidad operativa, pueda soportar esas limitaciones y convertirlas en restricciones a cumplir. Sin embargo la Operación Real debería tratar de implementar las prácticas que el modelo propone, revisando previamente las posibilidades, dejando de lado las preferencias personales.
- El modelo puede llegar a proponer que una planta participe más, en porcentaje, en el abastecimiento de un grupo de tanques específico, lo cual puede implicar movimientos de válvulas (cierre y apertura). Hoy en día, para la Gerencia de Aguas de EEPPM, el movimiento de válvulas de conducciones (cierre y apertura) en la red, se ha convertido en uno de sus asuntos más críticos, ya que esto genera en la mayoría de los casos, la remoción del biofilm (capa de material incrustado adherida a las paredes internas de las tuberías) modificando las características de calidad del agua; por esta razón dichos movimientos no son tan fáciles de realizar, sin embargo el modelo está planteado para que esto sea posible.
- El modelo trata de sacar el mejor provecho de los recursos disponibles; es este el caso de los volúmenes mínimos en los embales y de la capacidad de las fuentes de los bombeos.
- El modelo está planteado de tal forma que sea capaz de soportar las contingencias que se pudieran llegar a presentar con la salida de alguna de las estaciones de bombeo, problemas en captaciones, problemas en las plantas de potabilización, etc, ya que sólo bastaría con modificar los parámetros relacionados con la estructura que no puede estar en funcionamiento.
- El modelo da la posibilidad de comparar el costo de los bombeos de agua cruda con los beneficios recibidos cuando ese mismo volumen de agua genera energía, y así poder tener un criterio más para establecer la negociación de compraventa de energía con la Gerencia de Distribución Energía.
- Debido a que el modelo no soporta comportamientos puntuales intramensuales que intervengan en la operación del día a día, se podría mejorar la resolución de las variables y parámetros, siempre y cuando exista la información. Por ejemplo, caudales

de las fuentes en m³/día, niveles finales diarios para los embalses, etc, con el fin de que la respuesta del modelo pueda incluir esas condiciones intramensuales, y así asegurar más la confiabilidad del mismo.

- El modelo es dependiente de las proyecciones hidrológicas y de demandas, por lo que se recomienda que, en caso de llegar a implementar el modelo, y con el fin de ir logrando mejores resultados, se defina un procedimiento, para proyectar las demandas históricas y determinar los caudales de las fuentes.
- Se propone que el modelo sea utilizado como una herramienta complementaria para realizar la operación y tomar decisiones, teniendo en cuenta que puede servir de guía para medir la distancia que hay entre la forma como se vaya operando en la realidad, y la forma como el modelo lo propone, que en últimas, es una forma bastante eficiente.
- Se propone que cada uno de los parámetros del modelo que son medibles sean verificados periódicamente, y así tener mayor confiabilidad sobre los resultados.
- Valdría la pena revisar por parte de EEPPM, las medidas que deberían tomarse para reestablecer el significado concreto de la interconexión del sistema, inclusive generando redundancias cuyo costo esté compensado por los beneficios de la interconexión, ya que el modelo cuenta con las características y las posibilidades que brinda un sistema interconectado.
- Por último se concluye que la propuesta presentada de MODELO DE DESPACHO ÓPTIMO DEL SISTEMA INTERCONECTADO DE ACUEDUCTO DE LAS EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN, con el alcance en cuanto espacio y elementos incorporados, reúne todas las condiciones generales que hacen parte de la operación de dicho sistema y que es aplicable para realizar y planear la operación del mismo.

6. REFERENCIAS

Bazaraa, M. S., 1977.Linear Programming and network flows. Ed. John Wiley & Sons, New York, New York.

Brion, L. M., and Mays, L. W., 1991. Methodology for optimal operation fo pumping stations in water distribution systems. J. Hydr. Engrg., ASCE, 117(11), 1551-1569.

Coulbeck, B., and Sterling M., "Optimal control of water distribution systems." Proc., Institute of Electrical Engineers, 125 (9), 1.039 -1.044, 1978.

CPLEX Optimization, Inc., 1994. Using the CPLEX Callable Library.

Crawley, P., and Dandy, G., 1993. Optimal operation of Multiple-Reservoir System., J. of Water Resour. Plng. And Mgmt., 119 (1), 1-17,

Diba, A., and Mahjoub, M., 1994. Optimal operation multiple-reservoir system. J. of Water Resour. Plng. And Mgmt., 120 (2), 742-747

Hardley, G., 1962. Linear Programming. Ed. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. , Reading, Massachusetts.

Ignizio, J. P., 1988. Linear Programming in single & multiple objective system. Ed. Prentice – Hall.

Jowitt, P., and Germanapoulos, G., 1992. Optimal scheduling in water-supply networks. J. Water Resour. Plng. And Mgmt., ASCE, 118(4), 406-422.

Lansey, K.E., 1994. Optimal pump operations considering pump switches. J. of Water Resour. Plng. And Mgmt., 120 (1), 17-35.

Little, K., and McCrodden, B., 1989. Minimization of raw water pumping costs using MILP. J. of Water Resour. Plng. And Mgmt., 115 (4), 511-522.

Luenberger, D. G., 1973. Introduction to linear and no linear programming. Ed. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. , Reading, Massachusetts.

Ormsbee, L., and Lansey, K., 1994. Optimal control of water supply pumpings systems. J. of Water Resour. Plng. And Mgmt., 120 (2), 237-252.

Ormsbee, L., Walski, T., Chase, D., and Sharp, W., 1989. Methodology for improving pump operation efficiency. J. Water Resour. Plng. And Mgmt., ASCE, 115(2), 148-164.

Pezeshk, S., 1994. Data managemente for large-scale water-distribution optimization systems. J. of Water Resour. Plng. And Mgmt., 120 (1), 116-120.

Tarquin, A., and Dowdy, J., 1989. Optimal pump operation in water distribution. J. Hydr. Engrg, ASCE, 115(2), 158-168.

Zessler, U., and Shamir, U., 1989. Optimal operation of water distribution systems. J. Water Resour. Plng. and Mgmt., ASCE, 115(6), 735-752.