

Modelamiento del Suministro de Agua Para Satisfacer la Demanda A Costos Optimizados

René Beroiza Astudillo¹, Martin Schaffernitch Ph.D¹, Trung T. Pham Ph.D.

¹ Escuela de Ingeniería Informática Empresarial, Universidad de Talca – Campus Lircay, Talca, Chile

rberoiza@alumnos.otalca.cl , tpham@otalca.cl, martin@otalca.cl

Resumen. El suministro de agua es una parte importante en la supervivencia de ciudades densamente pobladas. El suministro de agua se usa para satisfacer la demanda creada por el uso humano e industrial. El suministro de agua se caracteriza por el costo asociado al número de reservas desde donde el agua es obtenida. La demanda de agua se caracteriza por las actividades que la población como un conjunto muestra colectivamente. Para generar un programa eficaz en la obtención de agua de esas reservas que optimice el costo (del suministro), es importante entender el comportamiento específico de las bombas de agua, la existencia de agua en cada reserva, la presión del sistema de tuberías, y los efectos de retroceso (presión en dirección contraria) cuando las bombas son utilizadas. Este estudio formula el costo del suministro de agua basado en estos factores (el número de reservas, el número de bombas utilizadas, y las características de eficiencia de las bombas). Así, la función de costo es planteada como una función objetivo en un problema de optimización para diseñar una estrategia para calendarizar y programar la obtención del agua. Aquí la demanda es estimada en base a datos históricos. Para este propósito se realizan simulaciones numéricas de suministro y así se formula una “estrategia de suministro óptimo”. El trabajo futuro de modelado de la demanda también se describe para nivelar de manera óptima la demanda versus el suministro de agua. Este trabajo se está llevando a cabo como un proyecto piloto para la compañía Aguas Nuevo Sur, S.A., en la ciudad de Talca, con futura extensión a otras localidades para un esquema de optimización global.

Palabras claves: modelamiento, optimización de costo, simulación

1. Introducción

El suministro de agua potable [1] es fundamental en el desarrollo de cualquier ciudad. En la actualidad existen diversas empresas que están a cargo del suministro de agua potable en distintas zonas del país [2]. Cada una de estas empresas produce agua potable extrayéndola de napas subterráneas o directamente de la superficie [3]. Cada día se está haciendo más difícil y más costoso producir agua debido a los continuos cambios climáticos que se están experimentando en todo el mundo. Es por ello que las empresas del sector buscan desarrollar y explorar nuevos métodos y procesos de producción de agua para garantizar el servicio. Los costos de producción de agua potable se concentran

principalmente en la extracción, en especial si se trabaja extrayendo agua de napas subterráneas mediante pozos y bombas. Dichos costos [4] representan casi un 90% de los costos variables de producción de agua potable. Es por ello que el poder crear nuevos procedimientos con el fin de optimizar el uso de dichos pozos es fundamental. En la práctica cada pozo tiene rendimientos y costos distintos unos de otros, y que dependen de distintas variables tales como el tipo de bomba, profundidad del pozo, mantención del mismo, etc [5]. Además hay que considerar la interdependencia de los niveles prácticos que en algunos casos el uso de un pozo determinado interfiere con el rendimiento lo que condiciona y determina el uso de dichos pozos.

El problema se plantea en dos partes:

1. Determinación de la cantidad [6] de agua que debe haberse acumulado en el estanque al inicio de un periodo donde la demanda supera el potencial de producción;
2. Determinación de una política o regla de activación de bombas que asegure que esta cantidad se acumule al menor costo posible.

Es por ello que en el presente estudio se mostrara como entregar una solución al manejo de los pozos utilizado dinámica de sistemas para crear modelos de simulación [7] que reflejen la realidad y permita a las empresas planificar de mejor forma sus procesos de extracción y producción de agua potable. El modelo conceptualiza esta situación como una variable de acumulación, un flujo de salida (la demanda) y un conjunto de flujos de entrada (desde los diferentes pozos). El periodo considerado es una jornada de 24 horas, en minutos. La demanda se determina en función del tiempo (minuto) y la temperatura (C°) y se mide en litros/segundo. La producción también se expresa en litros/segundo. Cada bomba tiene un consumo eléctrico (kw/minuto) y una producción (litros/segundo) que depende del potencial de la bomba y del estado de presión (activación) de las bombas siguientes. (Los rendimientos de litros/segundos se convierten en litros/minuto al multiplicar con segundos/minuto.)

Lo anterior se respalda en la teoría de que no es necesario llenar los pozos sino que se puede mantener un menor nivel de agua en el estanque con el fin de llenarlo progresivamente utilizando los pozos menos costosos por periodos más prolongados de tiempo.

Cabe destacar que todos los antecedentes que se presentan en el documento, provienen del análisis realizado para el proyecto de entrega de modelos de simulación para la producción de agua potable a costos optimizados para la empresa Aguas Nuevo Sur S.A. en su planta San Luis de la ciudad de Talca. Dicho estudio se encuentra en ejecución actualmente por lo que algunos de los resultados que se exhibirán en este documento se consideran parciales y por ende no definitivos.

2. Revisión del sistema

Las diferentes fuentes de aprovisionamiento de agua potable son: mediante pozos que extraen agua de napas subterráneas, o de flujos de agua tales como ríos,

fuentes o vertientes naturales. La fuente de agua que se utilizará para proveer agua potable va a depender mucho de la zona. Los métodos de extracción pueden ser mediante sondajes (Figura 1), superficiales o mixto. El sondaje se lleva a cabo mediante la utilización de diversos pozos y napas subterráneas de agua, las cuales son bombeadas para su posterior almacenamiento y tratamiento para que dicha agua pueda ser utilizada para el consumo humano.

La extracción subterránea es muy usada en los lugares donde es difícil encontrar aguas superficiales aptas para el consumo en la superficie. En la producción de agua potable, los mayores costos ocurren durante la extracción del agua, particularmente si proviene de napas subterráneas. Esto se debe a que en la actualidad las bombas de extracción que se utilizan tienen un consumo variable de combustible, dependiendo de ciertos factores, tales como el tipo de bomba, altura manométrica, rendimiento, etc. Esto se traduce en consumo energético el que es medido en kilowatt/hora y en términos de producción es el costo variable más relevante.

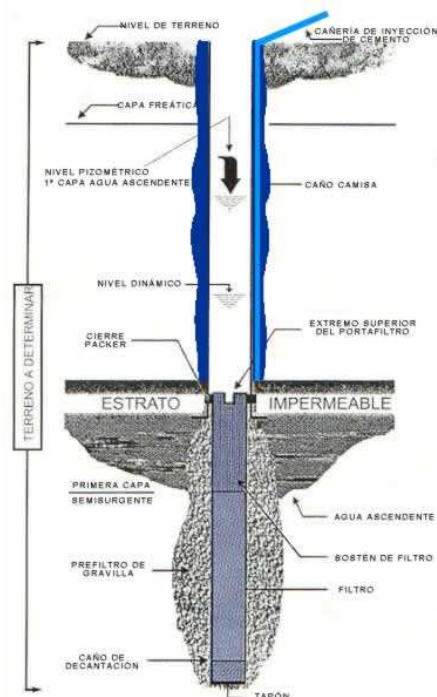


Fig 1. Esquema sondaje de agua subterránea.

Los costos de los químicos y tratamiento a las aguas para hacerlas potables es ínfimo en relación a los costos derivados de su extracción. Esto se acentúa mucho más en plantas de agua potable donde se trabaja mediante sondaje subterráneo.

3. Abastecimiento de agua potable

Esta sección comprende la identificación de los distintos factores que influyen al momento de satisfacer la demanda de agua potable de una ciudad. El abastecimiento de agua potable siempre debe estar asegurado por la compañía a cargo de este servicio. No importando lo que pase, incluso si hay cortes de energía eléctrica o algún incendio que requiera mucha agua para poder extinguirlo, el servicio siempre tiene que estar garantizado. Es por ello que en el caso de la ciudad de Talca, donde todas las plantas de agua potable trabajan con pozos y sondajes de aguas subterráneas, existen políticas que exigen que siempre los estanques de almacenamiento deben estar llenos con el fin de asegurar el servicio. Es por ello que para abastecer a la ciudad de agua potable, las plantas de agua potable operan con distintos conjuntos de pozos los que suministran agua al estanque de forma constante. Aunque las plantas de agua potable generalmente operan a su máxima capacidad de producción durante el día, y bajan su producción durante la noche. Esto se ajusta según las variaciones diarias esperadas.

Existen diversos factores que afectan la demanda de agua diaria, que son:

- **Día de la semana /Fin de semana** hay días donde se consume más por diversos motivos.
- **Estacionalidad:** dependiendo de la época o en la estación que se encuentre, la demanda variara ya que en los meses más calurosos se consume más agua.
- **Temperatura ambiental:** dicho factor puede influir en la demanda de agua ya que por lo general a mayor temperatura se consume más agua en la ciudad.

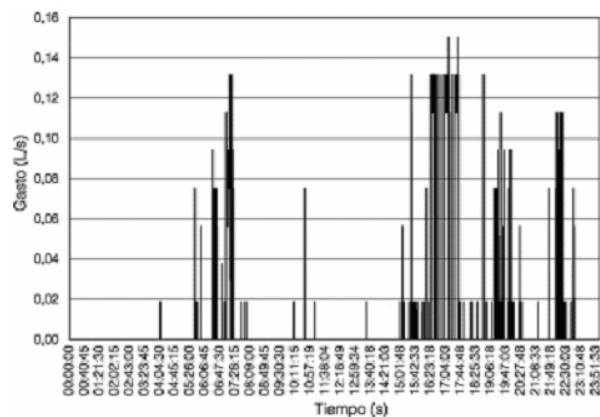


Gráfico 1. Variación típica de la demanda típica en un día cualquiera.

Debido a estas variaciones las plantas de producción de agua potable se planifican para mantener los estanques siempre llenos con el fin de satisfacer la demanda. Incluso ocurren momentos donde esta supera la capacidad de producción de las plantas de suministro. Debido a esto por lo general se da el caso que las plantas de producción una vez que llenen sus estanques apagan algunos de sus pozos. Esto ocurre en las noches ya que en el día la demanda de agua es mayor a la capacidad de producción de agua potable en las diversas plantas que suministran agua potable a la ciudad.

La capacidad de producción está dada por las posibles combinaciones de uso de los pozos, por el incremento de producción al agregar un nuevo pozo.

Ver Gráfico 2

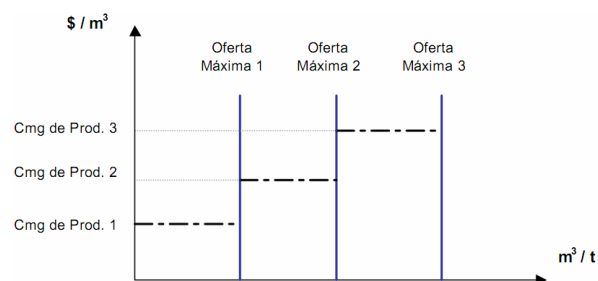


Gráfico 2: variación de la oferta de agua potable.

Los incrementos de producción no son progresivos. Diversos factores influyen en el rendimiento de las

bombas y pozos durante los sondajes que son: el nivel de pérdida por carga, cercanía entre un pozo y otro además de la capacidad de producción máxima de la planta. Es por ello que una mejor política de utilización de pozos es fundamental ya que permite reducir los costos. Pero para poder tomar cualquier determinación al respecto, se necesita información precisa para que el suministro no se vea afectado. Ya que por ser empresas que cubren una necesidad tan básica para los seres humanos como lo es el suministro de agua potable, no se pueden tomar decisiones sin fundamentos. Es aquí donde los modelos de simulación juegan un rol fundamental para dar solución a este tipo de problemas.

4. Marco teórico modelos de simulación

En la actualidad estos modelos se usan en distintas áreas para resolver diversas problemáticas, en especial cuando se refiere a algún tipo de sistema como sistema matemáticos, en entornos de la salud, y en el ámbito empresarial. [8, 9] Básicamente se utilizan para evaluar el comportamiento de distintas variables y sistemas, evaluando el efecto que tienen una sobre otra y los resultados que ello provoca.

Robert Shannon plantea:

“La simulación es el diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentalmente con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema del mundo real o evaluar varias estrategias con las cuales puedan operar el sistema.”

Para la creación de un modelo de simulación, se tiene que pasar por diversas etapas, tales como la visualización, formalización y validación entre otras como lo muestra la figura 3. Cada una de estas etapas es fundamental para tener un buen modelo que refleje realmente una situación o sistema. Hay conceptos claves que hay que manejar al momento de modelar, como por ejemplo:

- Variables: factores que influyen o afectan a un sistema.
- Flujos: representan algún tipo de entrada o salida de datos, información, etc.
- Acumuladores: representan algún tipo de almacén o bodega donde se acumulan datos.

Ya conociendo estos tres conceptos ya se puede empezar a desarrollar modelos simples de simulación. Ver Figura 2

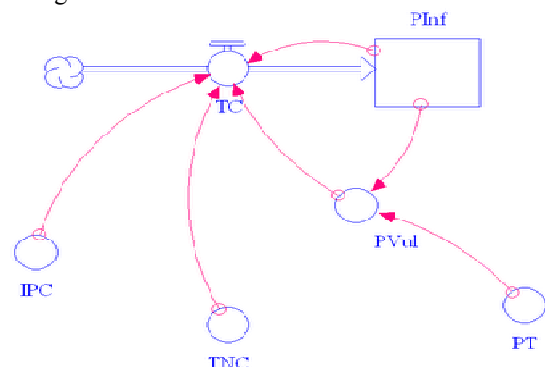


Fig 2. Modelo de simulación desarrollado en Ithink.

El diseño de un modelo de simulación tiene varias etapas. Ver Figura 3

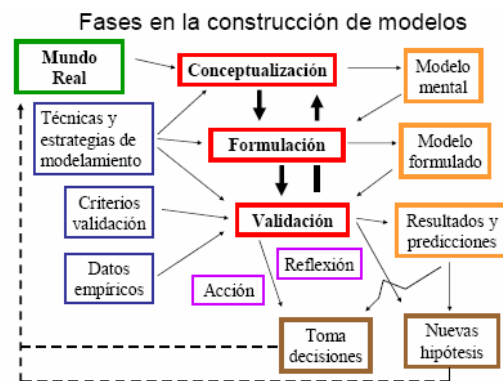


Fig 3. Ciclo iterativo para la construcción de un modelo de simulación. [4]

La dinámica de sistemas es algo relativamente nuevo pero que está dando buenos frutos a los que se han atrevido a experimentar con ello. Un claro ejemplo de ello son los frutos que a rendido en la agricultura [10] donde a nivel de la producción agrícola, los modelos han pasado a ser poderosos asistentes en la toma de decisiones en la cadena productiva de muchos rubros. Otro claro ejemplo de ello se da en el estudio en el área de la medicina con modelos de simulación matemáticos para el estudio de tendencias [11].

5. Modelos de simulación para la producción de agua potable

Debido a la naturaleza del problema, la dinámica de sistemas y los modelos de simulación entregan múltiples herramientas que permiten desarrollar soluciones basados en estos modelos que le permitan a las compañías de agua potable, como es el caso de Aguas Nuevo Sur S.A. en la Región del Maule, de mejorar sus procesos y tomar decisiones más fundamentadas y con mayor información. El fundamento para utilizar modelos de simulación es que estos pueden reflejar una situación real basándose en modelos matemáticos y dinámica de sistemas, ya que permite interactuar múltiples variables que pueden tener efecto en algún sistema, como por ejemplo acumuladores los que pueden representar los estanques de agua potable, y los flujos que pueden representar las entradas y las salidas de agua del estanque [12]. Además se tienen las variables que tienen directa relación e influyen en la cantidad de agua que entra como la que sale de los estanques [13].

En este caso en particular, hay que analizar mucha información histórica tanto de los niveles de producción diaria, como las temperaturas diarias y la demanda asociada a esa temperatura. Pero el enfoque estará en modelar el sistema de producción de agua potable, en especial todo relacionado con la utilización de los pozos y el manejo de los sondajes.

Para efectos de este estudio, se intentara resolver el problema relacionado con la producción debido a que es ahí donde se pueden realizar muchas mejoras y optimizar los procesos productivos. El problema consiste en que hay periodos durante el día que la demanda supera a la oferta en la ciudad de Talca. Es por ello que se utilizan los estanques para abastecer a la ciudad, además de mantener todos los pozos en funcionamiento. Para describir esta situación se presenta el siguiente grafico:

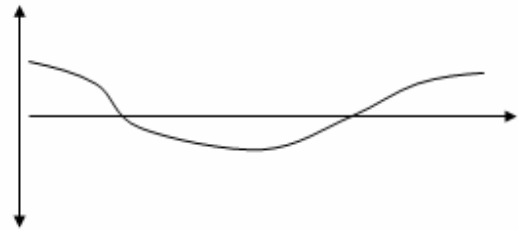


Gráfico 2: representación problema de producción

Esta grafica muestra el nivel de producción de agua potable y cuando el sistema entra a utilizar las reservas para satisfacer la demanda. Cuando el nivel de producción se encuentra bajo la línea, esto significa que la demanda es superior al nivel máximo de producción de las plantas de agua potable, por lo que hay que utilizar las reservas del estanque para que no existan problemas en el servicio de suministro de agua potable. Con el modelamiento se puede planificar de mejor manera la producción en momentos que la demanda es inferior a la oferta, con el fin de llenar el estanque en los momentos en que se vaya a necesitar para satisfacer la demanda y utilizar de manera más eficiente los pozos menos costosos [9, 14].

Para ello se tomaron en consideración diversas variables con el fin de tener una primera aproximación a la realidad. Estas variables influyen tanto en los costos como en la capacidad de producción de agua potable, dichas variables son:

- producción por hora.
- Activación de pozos.
- Demanda.
- Consumo bomba
- Precio KW/hora

Además de los flujos que representan los pozos y los costos asociados a cada pozo, dos acumuladores que representan a los estanques y a la función de costos asociadas a todo el proceso. Cabe destacar que este modelo es solo una primera aproximación, pero que refleja muy bien como se opera actualmente en las plantas de producción de agua potable de la ciudad de Talca.

Para poder explicar mejor el modelo, este se va a dividir en 2 secciones, una parte del modelo va a representar la

producción de agua potable la cual se detalla a continuación:

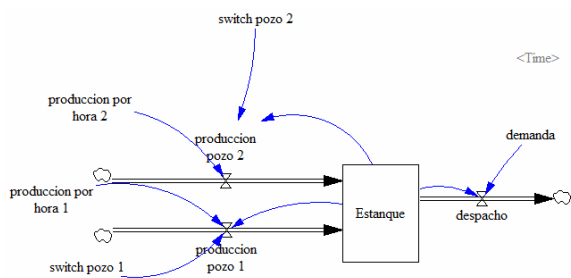


Fig. 4 Modelo preliminar producción de agua potable mediante sondaje.

En la figura 4 se puede apreciar claramente las entradas y salidas de agua del estanque. Para efectos del modelo solo se tomara un estanque para modelar la planta de agua potable, esto se debe a que en el sistema actual, los tanques se encuentran interconectados por los que se consideran como uno solo. Con el modelo representado en la figura 4 se puede mostrar los cambios y efectos suceden al ir activando los pozos. En la actualidad la planta San Luis de Talca trabaja con 9 pozos pero para el efecto de este estudio solo se tomaran 2 que representaran combinaciones de pozos con lo que ya se pueden evaluar algunos resultados. En una segunda parte del modelo se representaran los efectos que tiene la producción de agua potable en lo que a costos se refiere. Tal como se muestra a continuación:

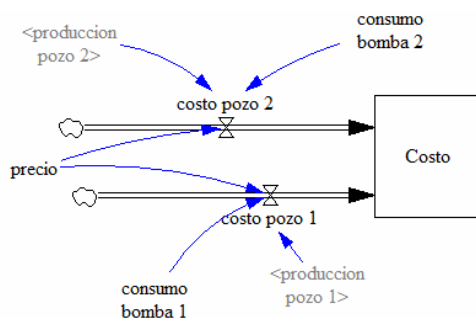


Fig. 5 modelo preliminar de costos en la producción de agua potable.

La figura 5 muestra como los costos de producción se van almacenando dependiendo de las políticas de

producción. Los dos modelos están relacionados y claramente se puede apreciar la interacción que existe entre ellos, en donde se pueden ir cambiando los valores y estudiando la reacción que genera en el resultado final. El diseño de este modelo ah sido, y está siendo probado con el fin de que realmente este reflejando la realidad. El proceso consistió en recabar la mayor cantidad de información posible con el fin de tener claro el proceso y como este trabaja, y obtener las variables que afectan al modelo además de identificar las relaciones entre una y otra. Como se puede apreciar, la dinámica de sistemas se encuentra bien presente en el modelo debido a que se puede apreciar claramente la interacción entre el sistema de producción y costos.

Debido a que este es un estudio en proceso, los resultados numéricos aun están siendo validados y contrastados con datos históricos. Pero si los resultados parciales muestran una clara tendencia, ya que si miramos los niveles de estanque que está mostrando el modelo se puede apreciar una clara disminución durante un día simulado en las horas pick de demanda.

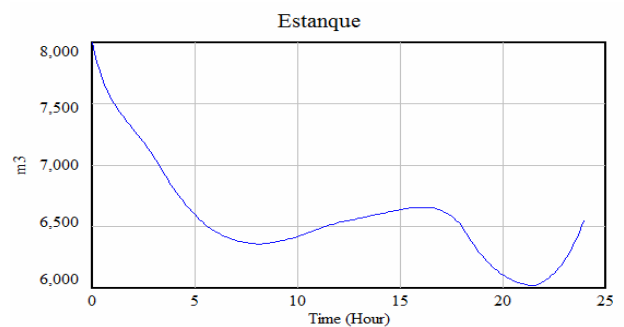


Gráfico 3: Nivel de estanque simulado.

Estos resultados son arrojados con el modelo utilizando un nivel de producción aproximado de la planta durante un día. Y a pesar que aún faltan pruebas que deben realizarse, si se puede decir que es muy cercano a lo que pasa en la realidad. Además que se respetan los niveles de seguridad donde el nivel del estanque nunca debe ser menor a 5000 metros cúbicos de agua.

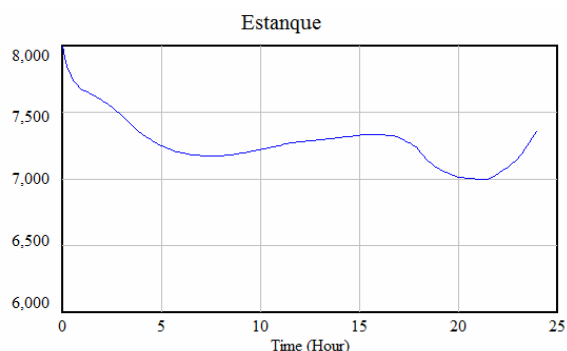


Gráfico 4: Segunda simulación de nivel de estanque.

Al simular una segunda combinación de producción de agua (esto es simular otra combinación de pozos durante un día lo que produce una oferta de agua la que debe satisfacer la demanda dentro de ciertos márgenes) se puede apreciar un aumento en el nivel del estanque debido a que se está usando mas pozos para satisfacer la demanda. Lo que provoca que la caída en el nivel del estanque sea menos brusca. Esto es importante ya que la planta nunca es capaz de producir lo que se está demandando por lo que en ciertos momentos del día se deben usar las reservas almacenadas en los estanques.

6. Trabajo futuro

Principalmente en este estudio se trabajo lo que es la simulación de la oferta de agua potable, en especial en lo que se refiere al manejo de los pozos y sondajes.

En el futuro se pretende complementar los modelos de simulación para que estos también incluyan la demanda y le permitan a la organización anticiparse a ella con el fin de planificar la producción en relación a esa demanda. Esto le va a permitir a la organización flexibilizar sus políticas utilizando la información que les entregaría estos modelos de simulación [15]. La idea es que los trabajadores ingresen el escenario esperado para algún día en específico, esto es, que se ingrese el día, época del año y la temperatura esperada para ese día. Con ello el modelo debería entregar la curva de demanda esperada para dicho día y la utilización optima de los pozos. Esto es el orden en el cual los pozos deben ser activados, dando preferencia a los menos costosos. La idea es que al poder anticipar la demanda de agua, no sería necesario funcionar a máxima capacidad para

llenar el estanque lo más rápido posible, sino que llenarlo a los niveles esperados para satisfacer la demanda utilizando los pozos menos costosos por un periodo más prolongado de tiempo y así manejar de manera más eficiente la producción, en especial lo que se refiere al gasto energético que tienen las bombas.

7. Conclusión

Con los resultados parciales se puede decir que los modelos están logrando reproducir lo que es la producción de agua potable (Oferta de agua potable) en la planta San Luis de Talca, correspondiente a la empresa Aguas Nuevo Sur S.A.

Al tener estos modelos, ya se pueden realizar estimaciones de que nivel de producción se necesita para satisfacer la demanda, manteniéndose dentro de los márgenes de seguridad. Con esto se puede verificar si las curvas de producción menos costosas son capaces de satisfacer la demanda sin correr ningún peligro en que se produzca algún desabastecimiento por falta de agua potable almacenada en los pozos de la planta.

Este tipo de modelo es bien flexible ya que permite cambiar ciertos parámetros y modificar los resultados. Como por ejemplo modificar el consumo KW/h el cual siempre esta variando. Y así no tener problemas en determinar los costos de operación basados en la curva de producción.

La implementación de soluciones basadas en la demanda esperada puede traer múltiples beneficios como por ejemplo:

- Reducción de costos en la extracción de agua.
- Conservación del agua y del medio ambiente.

Pero cualquier inversión en un proyecto de este tipo debe traducirse en mayores ingresos para la empresa u organización, ya que si no habrá motivos para llevarlo a cabo. En este caso en particular, Aguas Nuevo Sur, los modelos de simulación van a permitir entregar nuevos procedimientos donde los beneficios se verán traducidos en un mayor margen en relación a los costos. La flexibilidad que entregan los modelos de simulación los cuales pueden representar casi cualquier ambiente

donde se involucren múltiples sistemas. Dando herramientas que antes parecían ser solo hipotéticas, pero como es una teoría relativamente nueva aun es vista con escepticismo por el medio por lo que si se pueden mostrar los beneficios reales en una empresa que trae la simulación, se podrá generar un cambio y explorar los beneficios en rubros nunca antes pensados. [6]

Agradecimientos -

Este estudio fue apoyado por Aguas Nuevo Sur S.A. Talca quienes generosamente entregaron los datos y la posibilidad de visitar sus instalaciones.

Referencias

- [1] Petri S. Juuti, Tapio S. Katko, y Heikki S. Vuorinen. *Environmental history of water: global views on community water supply and sanitation*. London, UK: IWA Publishing (2007).
- [2] Pamela Kierns. *Water supply and sanitation services for the rural poor: the Gram Vikas experience*. Rugby, UK: Practical Action Publishing (2007).
- [3] Mark E. Savoca, Keith J. Lucey, y Brian D. Lanning. *Simulation of ground-water flow and delineation of areas contributing recharge to municipal water-supply wells in Muscatine, Iowa*. Denver, CO: U.S. Geological Survey, Information Services (2002).
- [4] Siu-lam Tang, Derek P. T. Yue, y Damien C. C. Ku. *Engineering and costs of dual water supply systems*. Seattle, WA: IWA (2007).
- [5] Prabhata K. Swamee, Ashok K. Sharma. *Design of water supply pipe networks*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience (2008).
- [6] Helena Alegre. *Performance indicators for water supply services*. Seattle, WA: IWA Pub. (2006).
- [7] Karen R. Burow. *Simulations of ground-water flow and particle pathline analysis in the zone of contribution of a public-supply well in Modesto, eastern San Joaquin Valley, California*. Reston, VA: U.S. Dept. of the Interior, U.S. Geological Survey (2008).
- [8] John Stermán. *Principles of systems*. Cambridge, MA: MIT Press (2000).
- [9] John Morecroft. *Business dynamics - systems thinking and modeling for a complex world*. New York, NY: John Wiley (2007).
- [10] Rodrigo Cazanga Solar, "Modelos de simulación en la agricultura".
- [11] Luis F. Chaves, María-Josefina Hernández y Santiago Ramos. "Simulación de modelos matemáticos como herramienta para el estudio de los reservorios de la leishmaniasis Cutánea Americana", *Divulgaciones matemáticas, Vol. 16, No. 1* (2008), pp 125-154.
- [12] Edoardo Mollona. "J. Morecroft, strategic modelling and business dynamics, a feedback systems approach". *Journal of management and governance, Vol. 12, No. 2* (May 2008), pp 213-217.
- [13] Steven Jackson. "Water models and water politics: Design, deliberation, and virtual accountability".
- [14] E. Hansen Raskin, Z. Zhu, y D. Stavisky. "Simulation of Water Supply and Demand in the Aral Sea Region" *Journal of water international, Vol. 17, No. 2* (1992), pp 55-67.
- [15] Martin Schaffernicht. "Indagación de Situaciones Complejas mediante la Dinámica de Sistemas", *Editorial Universidad de Talca* (2008).
- [16] "Plan regional de suministro de agua para el sureste de Wisconsin", *Folleto sumario* (Diciembre 2008).
- [17] Ministerio de planificación y cooperación, División de planificación, estudio e inversiones, departamento de inversiones. "Metodología de proyectos de agua potable".
- [18] Carlos A. Tapia. "Sistemas, modelos y simulación"
- [19] Jay W. Forrester "Learning and renewal", *The McKinsey Quarterly No 4*. (1995), pp 6-15.
- [20] Jay Forrester. *Industrial Dynamics*. Cambridge, MA: MIT Press (1968).