

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LA RED DE AGUA POTABLE EN SALINA CRUZ, MÉXICO*

ADRIANA ENEIDA PONCE MARTÍNEZ**

<https://orcid.org/0000-0002-8435-8047>

Universidad del Istmo, Departamento de Ingeniería Industrial, Tehuantepec, México

EDUARDO MARTÍNEZ MENDOZA

<https://orcid.org/0000-0002-8670-0221>

Universidad del Istmo, Departamento de Ingeniería Industrial, Tehuantepec, México

RAFAEL RÍOS ESPERANZA

<https://orcid.org/0000-0002-9568-6388>

Universidad del Istmo, Departamento de Ingeniería Industrial, Tehuantepec, México

Recibido: 1 de febrero del 2023 / Aceptado: 21 de marzo del 2023

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2023.n44.6249>

RESUMEN. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el desempeño de una red de distribución de agua potable. Los datos se obtuvieron por medio del personal del sistema de aguas del municipio en estudio. Se emplearon métricas de capacidad Six Sigma para evaluar su desempeño mediante la simulación con el *software* EPANET. De acuerdo con los resultados, el sistema estudiado no cumple con los requerimientos de los usuarios. El desabastecimiento de agua no se debe a la falta de extracción, sino a las pérdidas que ocurren en el sistema, que pueden alcanzar hasta el 43 %. Se comparó el desempeño actual con el obtenido al inducir cambio en la simulación. El desempeño de la red puede ser mejorado con cambios en algunas condiciones de bombeo, distribución; además, la red requiere revisión y mantenimiento para evitar la pérdida de agua. Incrementar la extracción ocultaría el problema de desperdicio y generaría sobreexplotación de los pozos.

PALABRAS CLAVE: redes de distribución del agua / agua potable / simulación por computadora / Six Sigma

* Este estudio no fue financiado por ninguna entidad.

** Autor corresponsal.

Correos electrónicos en orden de aparición: ponce.mtz.adri@hotmail.com; ed_mtzm@hotmail.com; rrios_esperanza@hotmail.com

PERFORMANCE ANALYSIS OF THE WATER SUPPLY SYSTEM IN SALINA CRUZ, OAXACA

ABSTRACT. The aim of this work is to analyze the performance of a drinking water supply system. The data was collected by the city's water system staff. The water supply system performance was measured using Six Sigma metrics on an EPANET simulation. Initial conditions were compared to future scenarios under implemented changes. The results showed that the current water supply is incapable of satisfying user requirements. The water shortage is not due to a lack of extraction but to losses of up to 43% that occur within the system itself. However, according to the simulation, the system's capacity can be improved by applying changes to the pumping and distribution conditions. Inspection and maintenance of the network is a priority in order to mitigate large water losses. Increasing extraction would mask the waste problem and lead to an overexploitation of the well.

KEYWORDS: water supply network / drinking water / computer simulation / Six Sigma

1. INTRODUCCIÓN

En los años recientes, la contaminación y destrucción acelerada de las fuentes de agua han generado problemas de escasez a más del 40 % de la población mundial (Acosta, 2010; UN, 2019). En suma, para el año 2050, el 25 % de la población mundial viviría afectada por la escasez prolongada de agua dulce, y no se lograría cubrir el volumen de entre 100 y 200 litros de agua para satisfacer las necesidades básicas y domésticas de una persona (WHO, 2003; UN, 2019).

El acceso al agua alcanzó su configuración jurídica en el sistema internacional de derechos humanos en el 2010 (Becerra Ramírez & Salas Benítez, 2016). Esto fue un hecho fundamental, porque su acceso puede considerarse como requisito y supuesto de otros derechos humanos, como la salud, la alimentación o la vivienda (Becerra Ramírez & Salas Benítez, 2016). El abastecimiento del agua está más allá de un servicio público que debe proveer cada entidad federativa. Se trata de una necesidad colectiva, básica, fundamental para la supervivencia humana y la sustentabilidad medioambiental. Esto es una necesidad absoluta, porque no existe por voluntad de las personas, se trata de un recurso vital para la vida (Tello Moreno, 2006).

En el caso mexicano, en la reforma realizada en el 2012 a la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, se estableció:

Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado garantizará este derecho, y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, estableciendo la participación de la Federación, las entidades federativas y los municipios, así como la participación de la ciudadanía para la consecución de dichos fines (DOF, 2012, 1).

Esta modificación reconoció y resaltó la importancia de este derecho, así como el papel fundamental del Estado. No obstante, continúa siendo un tema pendiente. En la actualidad, “12 millones de mexicanos no tienen acceso al agua potable, y 80 % de los cuerpos de agua está contaminado con descargas industriales” (IAGUA, 2018). Se trata del “cuarto país a nivel mundial con más personas viviendo con una severa escasez del líquido vital durante un periodo aproximado de 4 a 6 meses por año; lo que resulta en aproximadamente 20 millones de habitantes quienes sufren esta condición” (Osorno Córdova, 2018, 5).

La creciente demanda de agua en las ciudades ha dificultado que la población tenga acceso a ella de manera continua y adecuada, principalmente en los países en desarrollo (Lee & Schwab, 2005); entre otros factores, debido a una escasez del agua y a las malas prácticas en la operación y mantenimiento de los sistemas de suministro (Totsuka, Trifunovic & Vairavamorthy, 2004). En este sentido, el tratamiento del agua es

una de las principales razones para lograr agua potable segura y suministrarla como un componente vital a los hogares (Berg, 2015).

Los sistemas intermitentes de suministro de agua acarrearán problemas como: inequidad en el abastecimiento, riesgos para la salud y contaminación del agua, costos adicionales para los consumidores y suministradores, desperdicio de agua, inexactitud en los medidores de consumo, e inconvenientes para los consumidores (Totsuka, Trifunovic & Vairavamoorthy, 2004). Los riesgos de contaminación del agua existen en los depósitos de almacenamiento de los usuarios, condiciones de la tubería, o por el lavado inicial de la red (Ilaya-Ayza et al., 2015). A pesar de estas desventajas del sistema intermitente —el crecimiento y concentración de la demanda de agua, el cambio climático, la contaminación, su falta de tratamiento, entre otros factores—, este sistema de suministro podría tener un uso más frecuente en los próximos años; por lo cual, es necesario analizar su nivel de servicio para minimizar sus inconvenientes.

A nivel mundial existen retos para mejorar la gestión del agua; lo que “resulta evidente es la necesidad de estudiar las razones por las que los recursos hídricos, particularmente los destinados al abastecimiento humano y la conservación del medio ambiente, han carecido de una eficiente gestión por parte de las autoridades públicas” (Figueroa Elenes, Rentería Escobar & Martín Urbano, 2023, p. 39). “Uno de los problemas por los que atraviesan las ciudades medias es la prestación eficiente de los servicios urbanos (como el agua potable...), sus formas de gestión... falta de calidad y cantidad de los mismos” (Durán Juárez & Torres Rodríguez, 2006, p. 137). La gestión del agua potable enfrenta cada vez mayores retos; es un problema que se ha agravado en las últimas décadas en los núcleos urbanos (Figueroa Elenes, Rentería Escobar & Martín Urbano, 2023; Santiago Jiménez, 2023).

Es “urgente un replanteamiento de la política de gestión del agua... debe tener como objetivo hacer eficiente su uso, minimizando el desperdicio y utilizando como marco general el principio de sustentabilidad” (Figueroa Elenes, Rentería Escobar & Martín Urbano, 2023, p. 40). Para la mejora de la gestión, es necesario partir de una línea base, construida a partir de indicadores reproducibles y prácticos, que permitan medir el rendimiento del sistema y guiar la mejora, que, además, puedan comparar su desempeño con diferentes ciudades (Hernández García, Velázquez Angulo & Vázquez Gálvez, 2019).

En esta investigación se reportan los resultados de la evaluación del desempeño del suministro de agua en la red de Salina Cruz, en Oaxaca, México. El trabajo aporta una metodología para el desempeño de las redes de distribución de agua potable, que integra el uso de los indicadores de capacidad de procesos, tradicionalmente empleados en procesos de manufactura.

Las redes de distribución de agua potable son un sistema compuesto por la interconexión de tuberías, válvulas, tanques elevados, bombas, entre otros elementos de conexión, que guía el líquido a un punto de consumo (Gur & Spuhler, 2018). Este sistema, debido a sus condiciones hidráulicas, al incremento de la demanda, la dificultad de acceso a recursos, la falta de planeación, son difíciles de operar y controlar (Ilaya-Ayza et al., 2015; Morelos & Hernández, 2017). Una alternativa para el análisis de estos sistemas complejos son los modelos de simulación, que permiten no experimentar con el sistema real, ya que esto implicaría un alto costo económico, social y ambiental (Alvarruiz, Alzamora & Vidal, 2017; Iglesias Rey, Martínez Solano & Ribelles Aguilar, 2017; Meniconi et al., 2017).

Para la simulación de sistemas de suministro de agua, uno de los *software* más comunes para su análisis es EPANET, el cual es de acceso libre y permite el análisis de las redes bajo diferentes parámetros de operación, condiciones hidráulicas, topográficas, presión, financieras, entre otras (Abdy Sayyed, Gupta & Tanyimboh, 2014; Cabrera-Béjar & Tzatchkov, 2012; Morelos & Hernández, 2017); asimismo, el análisis de flujo de agua en tuberías, nodos, bombas, válvulas y tanques de almacenamiento o reserva, para medir, presión en nodos, variación del nivel de agua en cada tanque e incluso concentraciones químicas (Pacchin, Alvisi & Franchini, 2017; Ramana, Sudheer & Rajasekhar, 2015).

Medir el desempeño de un sistema mediante indicadores clave tiene un valor estratégico de información; sin embargo, en la práctica, esta métrica generalmente tiene como referencia el número de fugas reparadas, hecho que no proporciona una buena evaluación del sistema. De aquí, la importancia de establecer un proceso formal de medición *ad hoc* para generar la información temprana (Popova & Sharpanskykh, 2010). Los indicadores deben diseñarse de acuerdo con la naturaleza de la organización y su actividad, teniendo en cuenta los factores estratégicos clave de ella. Sin embargo, cuando se trata de procesos donde existen especificaciones de cumplimiento y variaciones propias del proceso, como la presión de suministro en el sistema, esta puede ser medida a partir de los indicadores de "capacidad de proceso" enmarcados en la metodología Six Sigma. Un indicador de "capacidad de proceso" compara el comportamiento de una característica de un proceso con sus especificaciones. Además, tiene la ventaja de reducir información compleja en un número (Steiner, Bovas & MacKay, 1997).

En el método DMAIC de Six Sigma, la medición de la capacidad de los procesos es fundamental para establecer una línea base de las condiciones actuales del proceso en estudio que, posteriormente, permitirá cuantificar el impacto de la mejora (Gejdoš, 2015). Esta evaluación del proceso permite obtener indicadores de capacidad a partir de la variación existente en el proceso (Srinivasan et al., 2014). Los indicadores de capacidad de Six Sigma, C_p y C_{pk} , permiten calificar el desempeño del proceso. Cuando el C_p es menor a 1, indica que el proceso no tiene la capacidad de cumplir con las especificaciones,

requiere acciones de mejora inmediatas; cuando C_p es igual a 1, la mayoría de las características de calidad cumplen con las especificaciones, aunque requiere un estricto seguimiento; si el C_p es mayor a 1, el proceso es adecuado para el trabajo, aunque puede ser mejorado aún (Chen, 2014).

Aunque los índices de capacidad han sido empleados ampliamente en procesos de manufactura para comparar el comportamiento del proceso respecto a especificaciones (Kane, 1986; Simanová, 2015), este trabajo propone su uso para la medición del desempeño en un sistema de agua potable. El índice C_p expresa el potencial grado de cumplimiento del proceso para garantizar que la característica de calidad se encuentra dentro de la tolerancia. Mientras que el índice C_{pk} se ocupa de la variabilidad, no solo del signo de calidad observado, sino también de su posición respecto a los límites de tolerancia (Bebr, Bícová & Zídková, 2017). Estos indicadores son empleados para procesos con distribución normal (Bracke & Backes, 2015). Se calculan empleando las ecuaciones 1 y 2.

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$C_{pk} = \min \left[\frac{\mu - LSL}{3\sigma}, \frac{USL - \mu}{3\sigma} \right] \quad (\text{Ec. 2})$$

En donde:

USL: Límite superior de especificaciones.

LSL: Límite inferior de especificaciones.

s= Desviación estándar.

μ = Media

Para el análisis de la "capacidad de proceso" a partir de estos índices, es necesario que el proceso en estudio sea estadísticamente controlado; es decir, trabaja solo con causas comunes de variación, su comportamiento a través del tiempo es predecible y, para monitorearlo, pueden emplearse las cartas de control de procesos (Bebr, Bícová & Zídková, 2017). En variables continuas, generalmente se emplean las cartas de medias y rangos, o medias y desviaciones (Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, 2009).

2. METODOLOGÍA

El trabajo se desarrolló en seis pasos: 1) descripción geográfica del sistema, 2) caracterización de la red de distribución, 3) construcción del sistema de variables, 4) creación del modelo de simulación, 5) análisis de acciones y 6) análisis de capacidad.

2.1 Descripción geográfica del sistema

El estudio se desarrolló en Salina Cruz, Oaxaca, en el sureste mexicano. Este municipio tiene una población de 82 327 habitantes (INEGI, 2018). Salina Cruz posee una topografía irregular, debido a la existencia de una cadena de cerros que, en las últimas décadas, han sido urbanizados, lo cual representa un reto para el suministro de agua potable debido a su elevación. La Tabla 1 muestra que, en una vivienda, la disponibilidad de agua es menor respecto a la media nacional. También destaca que el acceso al agua por medio de pipas es significativamente alto, respecto a la media nacional y por entidad federativa. Aunque los datos muestran que el agua entubada está disponible para el 92 % de la población, en la realidad, existen sectores sociales que padecen desabastecimiento prolongado (Ruiz, 2019; Santiago, 2019a; Tapia Barrita, 2018); por ello, esta población requiere del servicio de pipas para su abastecimiento. Sumado al desabastecimiento, debido a las condiciones de la red de distribución, la calidad del agua suministrada es afectada por los sedimentos (Tapia Barrita, 2018).

El Sistema de Agua Potable municipal de Salina Cruz, Oaxaca, reconoce la existencia de desabastecimiento, de fugas, la necesidad de mantenimiento y la reducción del volumen de extracción en algunos pozos (Martínez, 2017; Santiago, 2019b). Esta red tiene al menos 50 años de antigüedad (Santiago, 2018). Esto, sumado a factores externos como los sismos, ha generado daños estructurales que ocasionan la pérdida de entre 18 y 20 % del agua, equivalente a 60 litros por segundo (NVI Noticias, 2016).

Tabla 1

Distribución porcentual de acceso al agua

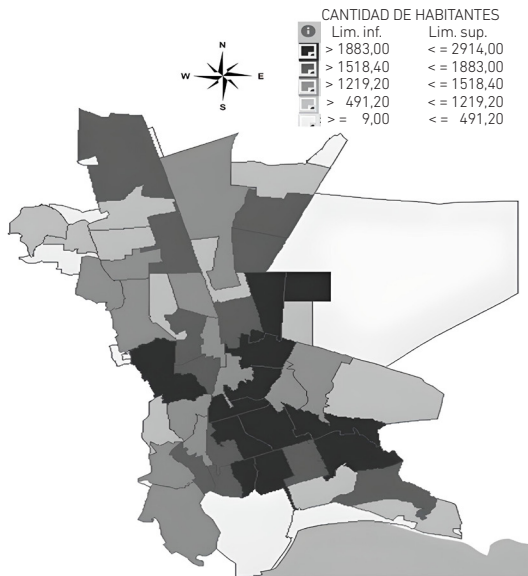
		País México	Estado Oaxaca	Municipio Salina Cruz	
Disponibilidad de agua	Total	94	85	92	
	Agua entubada	Dentro de la vivienda	77	44	59
		Fuera (dentro terreno)	23	56	41
	Total		6	13	8
		Llave comunitaria	5	4	2
	Otra vivienda		13	8	12
		Agua por acarreo en pipas	Pipa	23	20
	Pozo		46	54	31
	Río, arroyo o lago	9	9	0	
	Lluvia	3	5	0	
Otro	1	1	1		

Nota. Adaptado de INEGI, 2018. <https://www.inegi.org.mx/>

Se estudia la red de distribución de agua potable del municipio de Salina Cruz, ubicado en el estado de Oaxaca, el cual se localiza en el Istmo de Tehuantepec, con latitud norte 16°09'30" y longitud este 95°11'30". La Figura 1 muestra la densidad de población en cada una de las 61 áreas geostatísticas básicas (AGEB) (INEGI, 2012) donde se desarrolló este estudio.

Figura 1

Densidad poblacional por AGEB, Salina Cruz



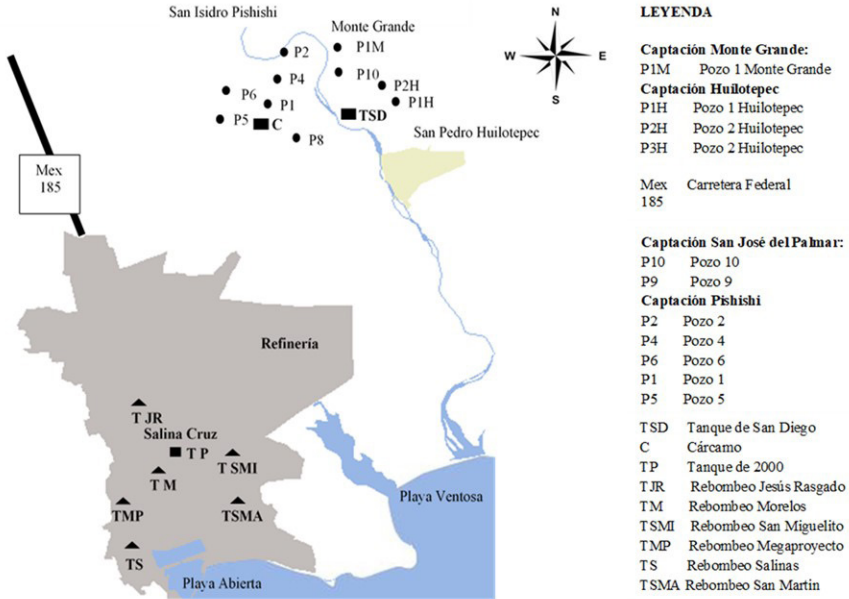
Nota. INEGI, 2012

2.2 Descripción de la red de distribución

En la Figura 2, se muestra la ubicación de los pozos de captación de agua, los tanques de almacenamiento y puntos de rebombeo en el sistema. La red de distribución de agua en Salina Cruz alcanza elevaciones ligeramente por arriba de 200 m sobre el nivel del mar; debido a esto y a la orografía, esta red de distribución es un sistema tipo árbol, porque tiene ramificaciones que no cierran circuitos.

Figura 2

Pozos y tanques del sistema

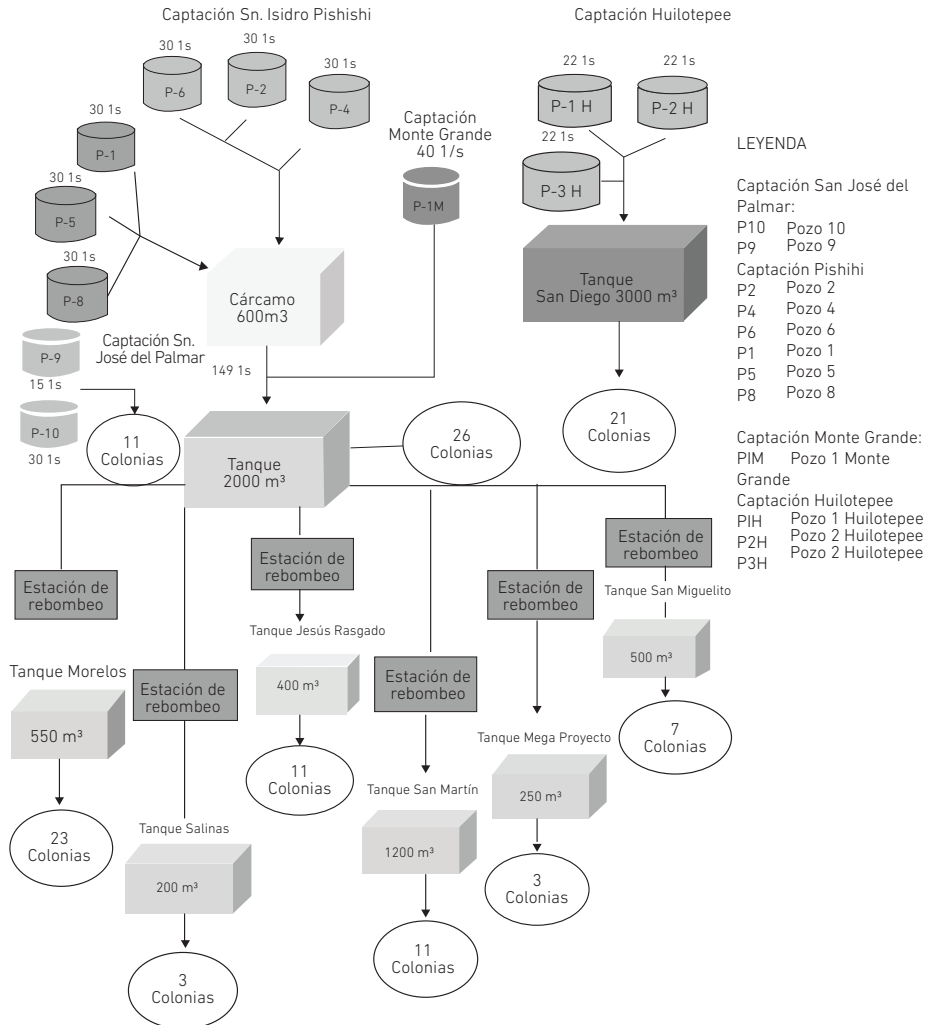


Nota. Ponce Martínez, 2019

La Figura 3 muestra la red de distribución en estudio, que se compone de 12 pozos funcionales, con profundidades de 50 metros, ninguno ubicado en el terreno municipal: 6 en San Isidro Pishishi, 3 en Huilotepec, 2 en San José del Palmar, y 1 en Monte Grande. Se muestran también la configuración del sistema, sus parámetros de operación, la interconexión entre los pozos y los sectores que atiende. De todos los pozos, solamente los dos ubicados en San José del Palmar envían el suministro directo a los usuarios, los demás emplean sistemas de bombeo para concentrar el líquido en tres tanques principales, de donde el agua es bombeada a seis tanques de almacenamiento en zonas altas para su distribución a la población. La información referente al sistema, como sus parámetros, características y demanda, fueron obtenidos de manera directa del personal del Sistema de Agua Potable (SAP-Salina Cruz), y a partir de la revisión de literatura.

Figura 3

Sistema de agua potable, Salina Cruz



Nota. Ponce Martínez, 2019

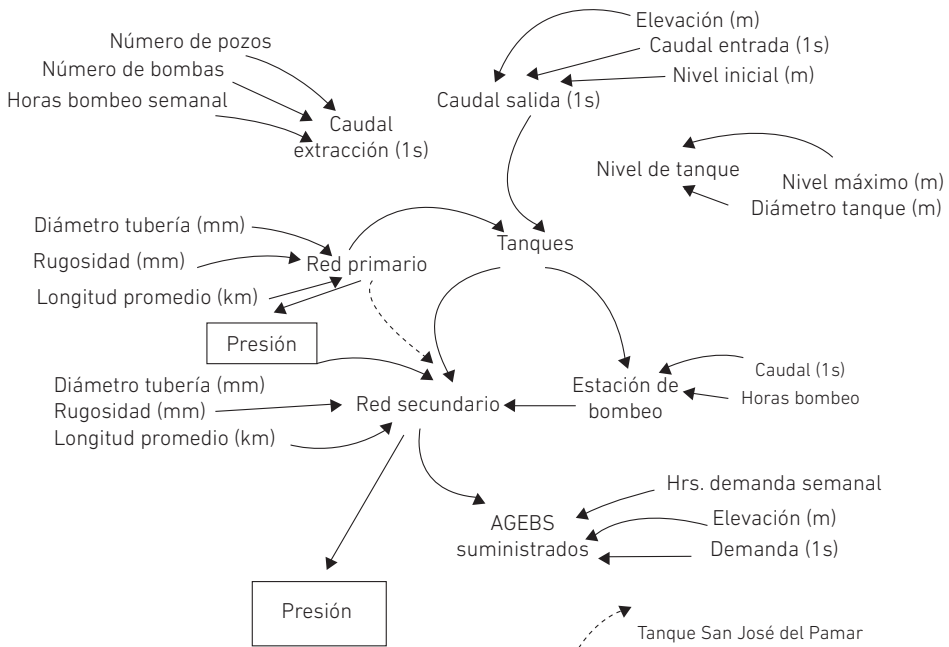
El agua extraída de los pozos es suministrada por medio de la denominada red primaria a tanques de almacenamiento para su distribución. Posteriormente, a través de la red secundaria, es enviada a través de estaciones de bombeo a tanques elevados que facilitan su suministro a los usuarios del sistema; excepto para el pozo San José del Palmar, donde el suministro se envía de manera directa a los consumidores.

2.3 Construcción del sistema de variables

La Figura 4 muestra las variables consideradas en el sistema de simulación. La línea punteada aplica en el caso del tanque San José del Palmar, que envía el líquido sin pasar por sistemas de almacenamiento.

Figura 4

Sistema de variables



2.4 Creación del modelo de simulación

Se desarrolló un modelo de simulación en el *software* EPANET para replicar el sistema en estudio, se simuló por un periodo de 168 horas. Este tiempo de simulación se realizó de acuerdo con el plan de bombeo semanal del SAP. Ante la falta de datos históricos de los niveles de presión para validar el modelo de simulación, como primer paso, el personal del SAP confirmó, a partir de su experiencia, que los días con disponibilidad de agua en las Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB) correspondiera con lo ocurrido en el sistema real. También, se visitaron 30 AGEB para verificar si existió suministro el día que lo indicaba la simulación; se obtuvieron coincidencias en un 73 %, se construyó con un nivel de confianza un intervalo de confianza.

$$p \pm z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}} = [0,61 - 0,84] \quad (\text{Ec. 3})$$

En donde:

$p = 0,73$

$z_{\alpha/2} = 1,96$

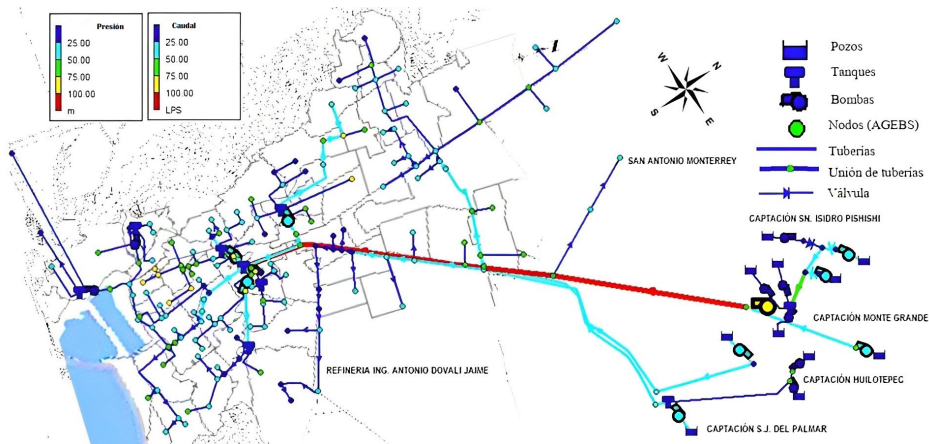
$n = 56 \text{ AGEBS}$

Otros datos verificados por el personal del SAP fueron: 1) la cantidad promedio de líquido recibido es menor a 150 litros por persona, 2) las presiones superiores a 50 m.c.a., 3) presiones bajas, inferiores a 10 m.c.a. y, 4) presiones tendientes a ser inferiores, entre 11 y 25 m.c.a.

El modelo construido (Figura 5) se hizo a partir de los planos e información proporcionada por el SAP; el diámetro que se utilizó en las tuberías de la red primaria fue de 508 mm, longitud en promedio de 2 km. Para la red secundaria, el diámetro fue de 203 mm, con una longitud en promedio de 500 m.

Figura 5

Sistema de suministro de agua potable en Salina Cruz



Nota. Ponce Martínez, 2019

2.5 Análisis de acciones

Se analizaron las siguientes acciones: (1) se incrementó el tiempo de bombeo semanal en el tanque Salinas, de 25 a 56 horas; en el tanque Jesús Rasgado, de 112 a 168 horas; en el tanque Mega Proyecto, de 18 a 24 horas; (2) para reducir las presiones altas, se colocaron válvulas reductoras de presión, para evitar rupturas en las tuberías secundarias, en los tanques: Jesús Rasgado, San Diego, San Martín, Megaproyecto y Morelos; (3) para incrementar las presiones menores a 10 m.c.a., se probó la instalación de válvulas de retención en la red, y la propuesta de la creación de un tanque elevado a las afueras de la colonia Emiliano Zapata. Para las presiones tendientes a ser bajas, se mantuvo constante el tiempo de suministro cada semana. En cada escenario se tomó como variable de respuesta la presión, porque define el abastecimiento en todas las AGEB, que debe cumplir las especificaciones, como límite inferior: 10 m.c.a., y 50 m.c.a. como límite superior (Comisión Nacional del Agua - Conagua, 2007).

2.6 Análisis de capacidad

Para evaluar el comportamiento del sistema, se emplearon métricas de estabilidad y capacidad. Estos indicadores se analizaron para la variable de salida a presión, debido a que es una de las principales características de calidad que se evalúa en las redes hidráulicas. Se emplearon los indicadores Cp, Cpk, Pp y Ppk, porque permiten conocer la amplitud natural y en qué medida cumplen los requerimientos (Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, 2012), a partir de las especificaciones de Conagua (2007).

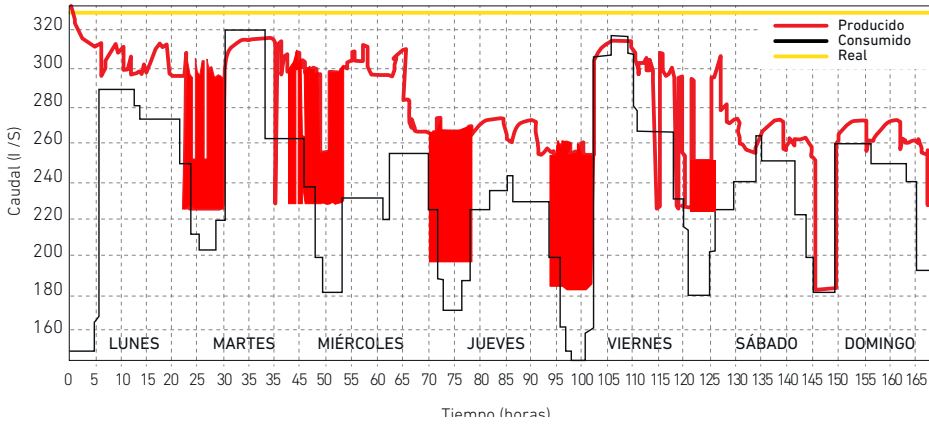
Al tratarse la presión de una variable continua, para estudiar la estabilidad se emplearon las cartas de control de medias y rangos, porque permiten observar y analizar la variabilidad y su comportamiento a través del tiempo (Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, 2012), se realizaron previamente pruebas de normalidad de los datos.

3. RESULTADOS

La Figura 6 muestra los balances de caudal obtenidos en la simulación del sistema, aún sin inducir cambios. Se observa que la mayor parte del tiempo, el caudal producido es superior al caudal consumido. Esto indica que el problema de desabastecimiento de agua no se origina por la falta de extracción de este recurso. El caudal producido decrece durante la simulación, debido a que EPANET apaga las bombas cuando detecta que los tanques llegan a su máximo nivel. Esto ocasiona que existan intervalos de tiempo, en su mayoría nocturnos, en los que se observan cambios en el caudal producido; en el sistema real, las bombas no paran, a menos que existan fallas. La diferencia que existe entre el caudal extraído en el sistema real y el extraído en el modelo varía desde 3 % hasta 43 %. Esta diferencia puede deberse a fugas no detectadas en el sistema.

Figura 6

Balace de caudales

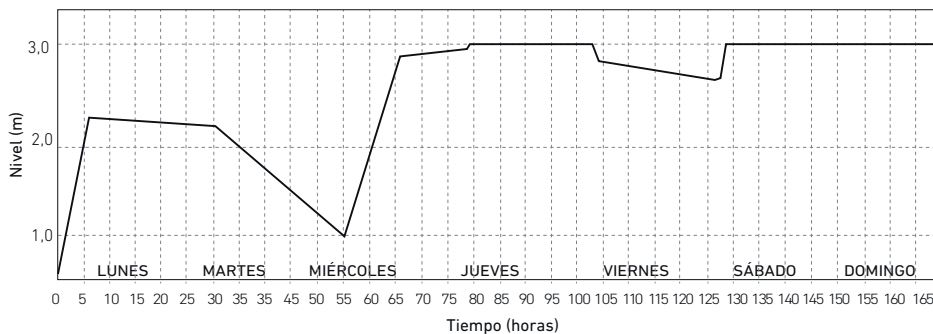


Respecto al tanque San Diego de 3000 m³, el cual abastece a 21 colonias, se encontró que, durante los lunes, martes y miércoles, el nivel de este tanque es bajo comparado con otros días, debido a que existe mayor demanda (Figura 7).

El nivel de este tanque está en función al número de AGEB que abastece cada día, por tanto, el número de habitantes. Este tanque San Diego tiene la capacidad de suministrar, incluso, más de 300 litros/día por persona. En la simulación, los resultados indican que la falta de agua potable en algunas colonias no se debe a la falta de líquido. Algunas causas potenciales son la falta de un programa equitativo de bombeo (tandeo) para una mejor distribución, o fugas en el sistema.

Figura 7

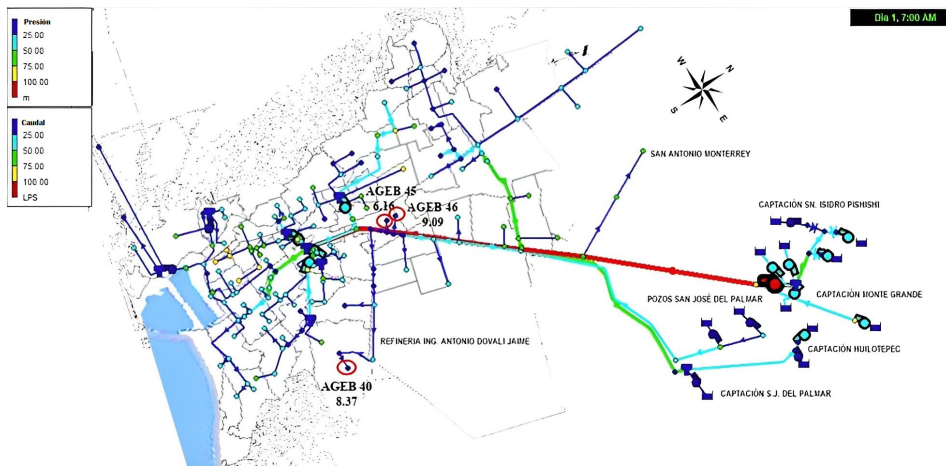
Niveles del tanque San Diego



La Figura 8 muestra la presión y caudales obtenidos en la simulación del día 1, la variable de salida del sistema que se estudió fue la presión, por tratarse de una característica de calidad relevante en el sistema para determinar si en él existen problemas de desabastecimiento. En este día se presentaron tres AGEB con niveles de presión por debajo de los 10 m.c.a. (círculos rojos).

Figura 8

Resultados de presión y caudal, día 1 (lunes)



Se analizó la presión en el sistema durante los siete días de la simulación, debido a que esta variable está directamente afectada por el caudal que circula en la tubería, y no todos los días existe este caudal, ya que la distribución de este recurso no es continua, depende del plan de bombeo que sigue el personal del SAP. Los valores mínimos y máximos permisibles para la variable presión son 10 m.c.a. y 50 m.c.a. respectivamente (Conagua, 2007). Las presiones obtenidas en cada AGEB se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2

Presiones obtenidas en cada AGEB

Tanque	AGEB	PRESIÓN (m.c.a.)	Tanque	AGEB	PRESIÓN (m.c.a.)
TSMI	57	28,06	TP	35	42,36
	15	33,19		9	35,2
	16	27,71		10	39,96
	41	34,7		37	39,38
	12	17,59		34	40,76
	36	33,26		38	40,36

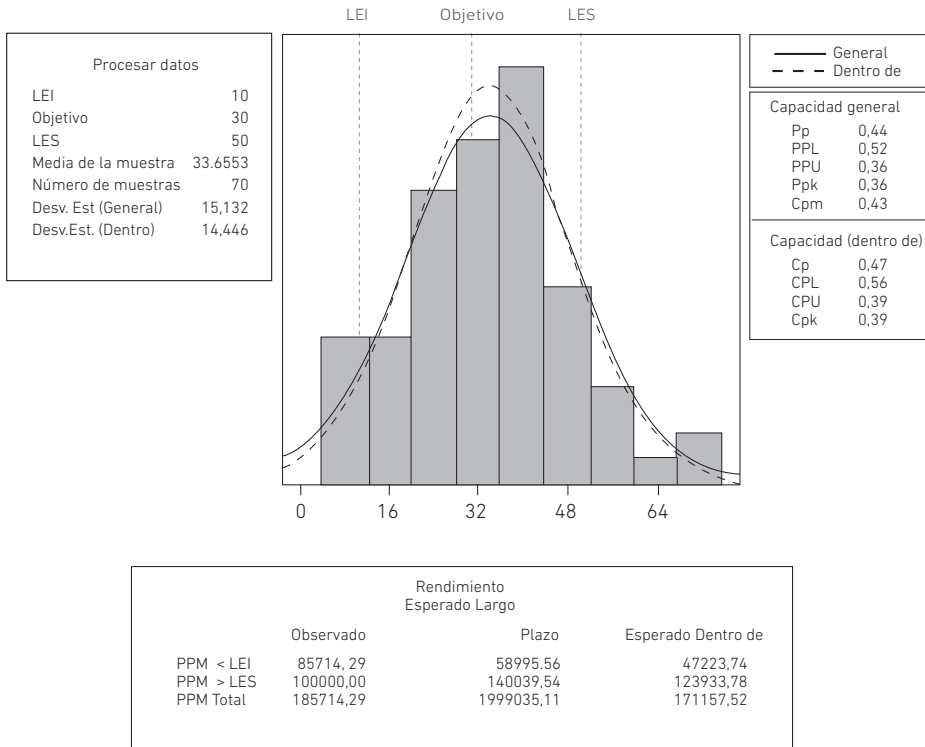
Tanque	AGEB	PRESIÓN (m.c.a.)	Tanque	AGEB	PRESIÓN (m.c.a.)
	30	36,16		12	26,42
	18	27,5		36	28,22
	31	26,32		3	38,79
	60	41,66		8	21,01
	58	48		58	20,99
	5	41,75		33	45,1
	3	47,24	TSD	25	33,41
	8	75,27		49	27,54
	14	38,14		48	32,25
	39	48,17		54	43,48
TS	1. Salinas	23,52		7	60,3
	2. Santita	16,19		55	48,3
	1. Escolleras	22,23		Granadillo	41,57
TJR	23	36,74		Brecha	39,34
	39	48,55		53	41,35
	18	44,17		52	26,89
	6	43,23		27	15,95
	20	6,79		51	5,08
	21	15,62		26	26,93
	22	71,53		28	4,08
	24	55,99		61	13,89
PSJ	47	28,82	TSMA	13	28,45
	17	28,74		37	53,94
	44	29,09		12	21,2
	46	9,09		40	55,54
	45	6,16	TMP	32	56,32
	42	12,23		31	41,58
	40	8,37		60	48,65

A partir de los valores de presión obtenidos en la simulación, se realizó un análisis de estabilidad y capacidad; se validó previamente que los datos estudiados pertenecieran a una población normal. En la Figura 9, se observa que los datos se ajustan a la línea de normalidad, el valor P es 0,524; al ser este un valor mayor a 0,05, se confirmó que los datos estudiados proceden de una población con distribución normal, una condición necesaria para realizar pruebas de capacidad y estabilidad.

Como resultado de la prueba de capacidad, se obtuvo un índice Cpk de 0,39, por lo que se afirma que el sistema no cumple con las especificaciones, se trata de un proceso de pobre desempeño. El Cp indica que tampoco posee la capacidad potencial de cumplimiento con las especificaciones; al igual que los indicadores de largo plazo (Pp, Ppk). En la Figura 9, se observa que existe un comportamiento de datos bajo la distribución normal, aunque existen presiones fuera de ambos límites de especificaciones. Por otro lado, el Cp de 0,47 indica que se trata de un proceso de muy bajo desempeño, incapaz de cumplir con los requerimientos establecidos; respecto al CPK, el CPU de 0,39, indica que existen no conformidades respecto al límite superior de especificaciones, que determinan el valor del CPK=0,39, confirmando que el proceso no tiene actualmente la capacidad de cumplir con las especificaciones. Respecto a los indicadores de largo plazo, Pp y PPK, estos son bajos y el proceso debe ser mejorado para cumplir con las especificaciones establecidas para la variable presión. La existencia de presiones fuera de las especificaciones (10,50 m. c. a.) generan problemas de escasez, debido a que una presión baja no permitiría que el líquido llegue a todos los puntos; en contraparte, una presión muy alta genera problemas en la red, posibles daños o rupturas en las tuberías.

Figura 9

Análisis de capacidad



3.1 Análisis de acciones

La Tabla 3 muestra la mejora en el abastecimiento de agua, a partir de los cambios realizados en el sistema al aumentar el tiempo de bombeo en tres tanques del sistema (Escenario 1). Se observa que, a partir de los cambios, mejora significativamente el suministro en las colonias abastecidas.

Tabla 3

Resultados al aumentar el tiempo de bombeo

Tanque	Colonias abastecidas	Aumento (hr)	Litros promedio	
			Antes	Cambios
Salinas	3	25 a 56	101	165
Jesús Rasgado	11	112 a 168	137	198
Megaproyecto	3	18 a 84	58	194

Para reducir la presión en las tuberías, y con esto evitar daños en ellas, se colocaron válvulas reductoras en varias unidades geoestadísticas básicas (Escenario 2) identificados con presiones superiores a 50 m.c.a. La Tabla 4 muestra los cambios obtenidos en la presión después de colocar válvulas en las AGEB. Se observa que, en la mayor parte de los casos, se logra estabilizar la presión; esto permitiría reducir la existencia de fugas en el sistema y la presencia de zonas con escasez de agua, debido a bajas presiones. En la AGEB 8, aunque se obtiene una presión de 17 m.c.a., esta aún se encuentra dentro de los límites de las especificaciones.

Tabla 4*Cambios en la presión al colocar válvulas en el sistema*

Tanque	AGEB	Colonias	Presión (m.c.a.)	
			Antes	Después
Jesús Rasgado	22	Hgo. Poniente	71,53	30
	24	Deportiva Sur	55,99	30
San Diego	7	César Linton	60,3	30
San Martín	37	San Juan, San Martín	53,94	30
	40	La Soledad	55,54	30
Megaproyecto	32	San Pablo Sur	56,32	30
Morelos	8	Guadalupe	75,27	17,45

Parte de los usuarios de las AGEB 40, 42, 45 y 46 cuentan con servicio solo cuando la demanda de la red disminuye. No se consideró cambiar la fuente de suministro de estas AGEB porque, de acuerdo con el personal del SAP Salina Cruz, esta parte de la red tiene la ventaja de un suministro continuo. Como alternativa, se probó la colocación de válvulas de retención en las AGEB 17, 44, 47 y 53 (Escenario 3). La Tabla 5 muestra los cambios en la variable de presión al colocar las válvulas de retención. Se observa que las AGEB suben su presión a niveles aceptados en las especificaciones establecidas.

Tabla 5*Resultados al colocar válvulas de retención*

Pozo	AGEB	Colonias	Presión (m.c.a.)	
			Antes	Después
San José del Palmar	40	Independencia	6,16	29,9
	42	Hgo. Oriente	9,09	32,8
	45	La Soledad	8,37	32,1
	46	Istmeña	12,23	36

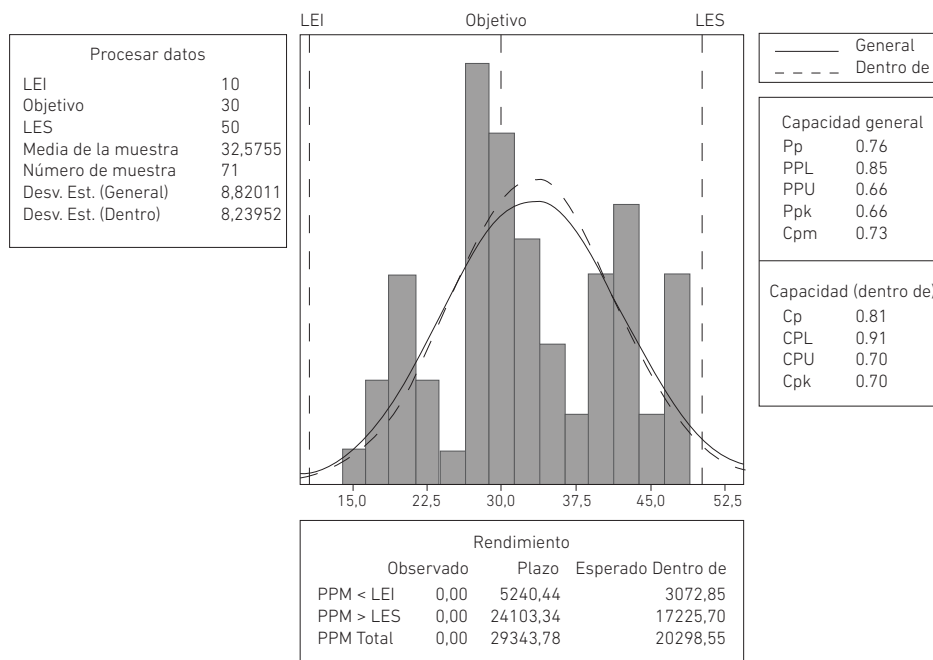
Para atender la baja presión en las AGEB 20, 28 y 50, se propone la creación de un tanque elevado en las afueras de la AGEB 23 (Escenario 4). Uno de los beneficios que tiene la creación de este tanque es abastecer a los nuevos pobladores que comienzan a habitar la colonia Cerro Alto (AGEB 1 y 2), ya que actualmente no cuentan con este servicio. Este nuevo tanque, además de abastecer a las AGEB 20, 28 y 51, también abastece a las AGEB 27 y 26, pertenecientes al tanque San Diego, y las AGEB 23, 24, 1 y 2, pertenecientes al tanque Jesús Rasgado, debido a la cercanía con este nuevo tanque, porque actualmente estas AGEB se encuentran retirados de los tanques que los abastecen. El nuevo tanque tendría una capacidad para abastecer a 6100 personas, equivalente al 7,6 % del total de la población. La fuente de suministro para este nuevo tanque sería la misma que para los demás tanques de rebombeo, de la misma manera tendría una estación de rebombeo para comenzar el llenado del este nuevo tanque; la bomba envía como máximo un caudal de 30 l/s. Las dimensiones del tanque nuevo son similares a las empleadas con los demás tanques de rebombeo actuales. Al realizar la simulación, el nivel de agua del tanque principal disminuye un metro, sin llegar a ser bajo; por lo cual, tiene capacidad para suministrar al tanque propuesto. Las presiones obtenidas para las AGEB suministradas por el nuevo tanque son: 17,95 m.c.a. para AGEB 1 y 2; 20 m.c.a. para 27, 28 y 21; 25 m.c.a. para 23; 27 m.c.a. para 26; y 36,5 m.c.a. para el AGEB 20; todos dentro del rango 10-50 m.c.a.

3.2 Análisis de capacidad

Al realizar nuevamente una simulación de una semana con los cambios anteriores en el sistema, se recurrió nuevamente al análisis de capacidad. La Figura 10 resume estos resultados. Se observa que el C_p crece de 0,47 a 0,81 después de los cambios, el C_{pk} cambió de 0,39 a 0,70. Aunque estos niveles aún están por debajo del mínimo recomendado (1), reflejan que el sistema mejora considerablemente con las propuestas consideradas; aunque aún no podría identificarse como un proceso de alto nivel de cumplimiento.

Figura 10

Análisis de capacidad, simulaciones



4. DISCUSIÓN

En el SAP no existían datos históricos sobre el comportamiento del sistema de distribución de agua, aunque, por su experiencia y por quejas de los usuarios, se conocía sobre problemas de abastecimiento a los usuarios (Ochoa, 2020; Tapia Barrita, 2020; Santiago, 2019b). Este comportamiento también fue aplicado en EPANET para el estudio del sistema, a partir de los seis pasos establecidos en el método de investigación.

En la región se ha manifestado la necesidad de perforar nuevos pozos para atender los problemas de desabastecimiento (Nivón, 2017; Santiago, 2018). Los resultados indicaron que esto se debe en gran medida a las fugas existentes en el sistema, por lo cual, se deben enfocar los esfuerzos en su mantenimiento. Lo anterior no implica que la planeación y creación de nuevos pozos no sean temas necesarios para estudiar, como parte de un proceso planificador en la gestión del sistema; implica que debe desarrollarse un programa de mantenimiento en la red porque, en el sistema actual, existen deficiencias en el mantenimiento; algunos equipos alcanzan entre 6 y 7 años sin supervisión (BBM Noticias, 2019). Se deben incluir en este programa de mantenimiento las instalaciones de los usuarios finales, para evitar las pérdidas actuales de líquido; como también lo señalan Quiroz (2019) y Tirado (2018).

Se identificó que las fugas en el sistema, en promedio, son del 23 %; aunque pueden alcanzar picos de 43 %; estas fugas ocurren principalmente en las AGEB donde la presión es mayor, debido a que la red está expuesta a mayor fatiga. El nivel de fugas identificado es mayor al 20 % y, de acuerdo con Lahlou (2009), es el umbral para dedicar atención primordial y acciones correctivas. Se encontró que existen AGEB por encima del máximo recomendado de 50 m.c.a., incluso algunas por encima de 70 m.c.a.; por lo cual, son necesarias estrategias para su detección y reparación. Se puede atender el problema de desabastecimiento suministrando mayor caudal al sistema; sin embargo, esta práctica solo ocultaría el problema y generaría sobreexplotación de los pozos.

El uso de indicadores de capacidad de la metodología Six Sigma para la medición de la capacidad de un sistema de suministro de agua potable es pertinente porque mide el grado de cumplimiento del sistema respecto a sus requerimientos. Se atiende la necesidad de contar con indicadores reproducibles y estandarizados para medir su desempeño y comparar su eficiencia con otros sistemas similares, un problema a atender en este tipo de sistemas, como lo indican Hernández García, Velázquez Angulo & Vázquez Gálvez (2019).

Si bien EPANET es un *software* empleado para el análisis de estos sistemas, donde se analizan la velocidad, presión, pérdidas, abastecimiento, entre otras variables (Morelos & Hernández, 2017; Pacchin, Alvisi, & Franchini, 2017), el presente trabajo aporta la medición de la capacidad de estos sistemas empleando indicadores de procesos, métricas que permiten comparar el grado de desempeño de los procesos, tomando como referencia los requisitos del cliente.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo aporta un método de análisis de sistemas de distribución de agua al emplear indicadores de control de calidad para la medición de su desempeño. Los pasos definidos permitieron volver a aplicar el comportamiento del sistema estudiado y definir propuestas de mejora; aún sin contar con datos históricos de su desempeño.

Se identificó que el desabastecimiento no se debe a la falta de extracción de agua, sino a fugas. Las fugas identificadas son mayores al umbral referido para destinar atención primordial (Lahlou, 2009). Este hallazgo es relevante para la planeación del sistema y el destino de recursos.

Con los escenarios simulados, se logró incrementar la capacidad real del proceso de 0,39 a 0,7; aunque aún se trataría de un sistema incapaz de cumplir sus requerimientos. Se recomienda otra evaluación después de atender las fugas en la red de suministro. El uso de indicadores de capacidad permitirá comparar el desempeño del sistema en función del cumplimiento de los requerimientos, tomando en este caso la presión como

variable de referencia. En futuros trabajos, será necesario incorporar el tiempo de disponibilidad como variable de calidad.

Una de las limitantes de la investigación fue la ausencia de datos sobre el comportamiento histórico del sistema, que, desde la experiencia del personal del SAP, sufre cambios en su comportamiento en el tiempo; sin embargo, no se contaban con datos para explicarla.

REFERENCIAS

- Abdy Sayyed, M. A. H., Gupta, R., & Tanyimboh, T. T. (2014). Modelling pressure deficient water distribution networks in EPANET. *Procedia Engineering*, 89, 626-631. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.487>
- Acosta, A. (2010). El agua, un derecho humano fundamental. En N. Montalvo Rueda (Ed.), *Agua. Un derecho humano fundamental* (1.ª ed.), pp. 7-46). https://www.academia.edu/37642571/Acosta_Alberto_Y_Martinez_Esperanza_Agua_Un_Derecho_Humano_Fundamental_pdf
- Alvarruiz, F., Alzamora, F. M., & Vidal, A. M. (2017). A toolkit for water distribution systems' simulation using the loop method and high performance computing. *Procedia Engineering*, 186, 303-310. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.250>
- BBM Noticias. (25 de junio del 2019). Mantenimiento en equipo principal, dejará sin agua a Salina Cruz. *BBM Noticias*. <http://www.bbmnoticias.com/index.php/local/item/5879-mantenimiento-en-equipo-principal-dejara-sin-agua-a-salina-cruz>
- Bebr, L., Bícová, K., & Zídková, H. (2017). Use of the ppm and its function in the production process. *Procedia Manufacturing*, 13, 608-615. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.122>
- Becerra Ramírez, J. D. J., & Salas Benítez, I. (2016). El derecho humano al acceso al agua potable: aspectos filosóficos y constitucionales de su configuración y garantía en latinoamérica. *Prolegómenos*, 19(37), 125. <https://doi.org/10.18359/prole.1684>
- Berg, P. A. (2015). The world's need for household water treatment. *Journal AWWA*, 107(10), 36-44. <https://doi.org/10.5942/jawwa.2015.107.0144>
- Bracke, S., & Backes, B. (2015). Multidimensional analyses of manufacturing processes: Process capability within the case study shape drill manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 2380-2386. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.444>
- Cabrera-Béjar, J. A., & Tzatchkov, V. G. (2012). Modelación de redes de distribución de agua con suministro intermitente. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3(2), 5-25. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353531977001>

- Chen, M.-S. (2014). Application of indices Cp and Cpk to improve quality control capability in clinical biochemistry laboratories. *The Chinese Journal of Physiology*, 57(2), 63-68. <https://doi.org/10.4077/CJP.2014.BAB170>
- CONAGUA. (2007). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (1.ª ed.). www.cna.gob.mx
- DOF. (2012). Decreto por el que se declara reformado el párrafo quinto y se adiciona un párrafo sexto recorriéndose en su orden los subsecuentes, al artículo 4o. *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*. https://www.dof.gob.mx/nota_to_imagen_fs.php?codnota=5232952&fecha=08/02/2012&cod_diario=244788
- Durán Juárez, J. M., & Torres Rodríguez, A. (2006). Los problemas del abastecimiento de agua potable en una ciudad media. *Espiral*, 12(36), 129-162. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=13803605>
- Figuroa Elenes, J. T., Rentería Escobar, R., & Martín Urbano, P. (2023). La gestión de los recursos hídricos en el municipio de Culiacán, Sinaloa, México. *Economía, Población y Desarrollo: Cuadernos de Trabajo de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez*. 13(73). 2-42. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8769421>
- Gejdoš, P. (2015). Continuous quality improvement by statistical process control. *Procedia Economics and Finance*, 34, 565-572. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)01669-X](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)01669-X)
- Gutiérrez Pulido, H., & de la Vara Salazar, R. (2009). *Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma* (2.ª ed.). México: McGraw Hill.
- Gutiérrez Pulido, H., & de la Vara Salazar, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos* (3.ª ed.). México: McGraw Hill.
- Gur, E., & Spuhler, D. (2018). Sustainable sanitation and water management. SSWM. <https://sswm.info/water-nutrient-cycle/water-distribution/hardwares/distribution-pipes-and-channels/water-distribution-pipes>
- Hernández García, Y. G., Velázquez Angulo, G., & Vázquez Gálvez, F. A. (2019). Indicadores de agua y saneamiento en ISO 37120. Caso de estudio: Ciudad Juárez. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, (6), 65-77. <https://doi.org/10.7440/res64.2018.03>
- IAGUA (2018). La crisis del agua en México provoca que 12 millones de personas no tengan acceso a agua potable. *Agua*. <https://www.iagua.es/noticias/conacyt/crisis-agua-mexico-provoca-que-12-millones-personas-no-tengan-acceso-agua-potable>

- Iglesias-Rey, P. L., Martínez-Solano, F. J., & Ribelles-Aquilar, J. V. (2017). Extending EPANET capabilities with add-in-tools. *Procedia Engineering*, 186, 626–634. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.279>
- Ilaya-Ayza, A., Campbell, E., Pérez-García, R., & Izquierdo, J. (2015). La problemática de los sistemas de suministro de agua intermitentes. Aspectos generales. *Revista Ingeniería de Obras Civiles*, 5, 33–41. <https://revistas.ufro.cl/ojs/index.php/rioc/article/view/1990>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía - INEGI. (2012). *SCINCE*. INEGI. <http://gaia.inegi.org.mx/scince2/viewer.html>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía - INEGI. (2018). Censos y conteos. Población y Vivienda. <https://www.inegi.org.mx/>
- Kane, V. E. (1986). Process capability indices. *Journal of Quality Technology*, 18(1), 41–52. <https://doi.org/10.1080/00224065.1986.11978984>
- Lahlou, Z. M. (2009). Detección de fugas y control de pérdida de agua. *National Environmental Services Center*, 1-4. <https://agua.org.mx/biblioteca/deteccion-fugas-control-perdida-agua/>
- Lee, E. J., & Schwab, K. J. (2005). Deficiencies in drinking water distribution systems in developing countries. *Journal of Water and Health*, 109-127. <https://doi.org/10.2166/wh.2005.0012>
- Martínez, E. (2017, 22 de marzo). Puerto de Salina Cruz al borde de un posible colapso de agua potable. *Matutinazo*. <http://matutinazo.com/2017/03/22/puerto-salina-cruz-al-borde-posible-colapso-agua-potable/>
- Meniconi, S., Brunone, B., van Zyl, K., & Mazzetti, E. (2017). Aqualibrium competition: Laboratory data and EPANet simulations. *Procedia Engineering*, 186, 522-529. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.265>
- Morelos, R. A., & Hernández, J. R. (2017). Modelación hidráulica de la red de distribución de agua potable en una ciudad mexicana EPANET. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 4, 131. <http://www.reibci.org/publicados/2017/abr/2200106.pdf>
- Nivón, M. de los Á. (2017, 3 de septiembre). Inversión millonaria resolverá desabasto de agua en Salina Cruz. *Primera Línea Oaxaca*. <https://primeralineamx.com/inversion-millonaria-resolvera-desabasto-de-agua-en-salina-cruz-rodolfo-leon-aragon/>
- NVI Noticias. (2016, 19 de abril). Se pierden en Salina Cruz 60 litros de agua por segundo. *NVI Noticias*. <https://www.nvinoticias.com/nota/6679/se-pierden-en-salina-cruz-60-litros-de-agua-por-segundo>

- Ochoa, P. (2020, 11 de marzo). Vecinos denuncian el desabasto de agua en Salina Cruz. *Meganoticias*. <https://www.meganoticias.mx/index.php/morelia/noticia/vecinos-denuncian-el-desabasto-de-agua-en-salina-cruz/132663>
- Osorno Córdova, C. (2018). Propuestas clave para la gestión democrática y sostenible del agua en México. <http://library.fes.de/pdf-files/bueros/mexiko/15612.pdf>
- Pacchin, E., Alvisi, S., & Franchini, M. (2017). A new non-iterative method for pressure-driven snapshot simulations with EPANET. *Procedia Engineering*, 186, 135-142. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.219>
- Ponce Martínez, A. E. (2019). *Modelo de simulación de la red hidráulica del municipio de Salina Cruz, Oaxaca* [Trabajo de fin de grado]. Universidad del Istmo, campus Tehuantepec.
- Popova, V., & Sharpanskykh, A. (2010). Modeling organizational performance indicators. *Information Systems*, 35(4), 505-527. <https://doi.org/10.1016/j.is.2009.12.001>
- Quiroz, C. (10 de septiembre del 2019). Denuncian fuga de agua potable en Salina Cruz. *MegaNoticias*. <https://www.meganoticias.mx/salina-cruz/noticia/denuncian-fuga-de-agua-potable-en-salina-cruz/97281>
- Ramana, G. V., Sudheer, C. V. S. S., & Rajasekhar, B. (2015). Network analysis of water distribution system in rural areas using EPANET. *Procedia Engineering*, 119, 496-505. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.875>
- Ruiz, A. L. (2019, 16 de septiembre). Grave escasez de agua potable en Salina Cruz. *Voz de Opinión*. <https://deopinion.com.mx/regional/2020/09/salina-cruz-sin-agua-potable/>
- Santiago, A. (2018, 23 de febrero). Se quedará sin agua Salina Cruz, Oaxaca. *El Imparcial Del Istmo*. <http://imparcialoaxaca.mx/istmo/127583/se-quedara-sin-agua-salina-cruz-oaxaca/>
- Santiago, A. (9 de septiembre del 2019a). Salina Cruz sufre por falta de agua potable. *El Imparcial Del Istmo*. <http://imparcialoaxaca.mx/istmo/351831/salina-cruz-sufre-por-falta-de-agua-potable/>
- Santiago, A. (28 de noviembre del 2019b). Enfrentan desabasto de agua en Salina Cruz. *El Imparcial del Istmo*. <http://imparcialoaxaca.mx/istmo/379490/enfrentan-desabasto-de-agua-en-salina-cruz/>
- Santiago Jiménez, L. A. (2023). La gobernanza del agua y los conflictos en América Latina. *InterNaciones*, 10(24), 97-119. <https://internaciones.cucsh.udg.mx/index.php/inter/article/download/7242/6396>

- Simanová, L. (2015). Specific proposal of the application and implementation Six Sigma in selected processes of the furniture manufacturing. *Procedia Economics and Finance*, 34, 268-275. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)01629-9](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)01629-9)
- Srinivasan, K., Muthu, S., Prasad, N. K., & Satheesh, G. (2014). Reduction of paint line defects in shock absorber through six sigma DMAIC phases. *Procedia Engineering*, 97, 1755-1764. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.327>
- Steiner, S., Bovas, A., & MacKay, J. (1997). Understanding Process Capability Indices. <http://www.stats.uwaterloo.ca/~shsteine/papers/cap.pdf>
- Tapia Barrita, A. (2020, 16 de noviembre). Salina Cruz sufre por aguda escasez de agua; acusan apatía de autoridades. *NVI Noticias*. <https://www.nvinoticias.com/nota/166607/salina-cruz-sufre-por-aguda-escasez-de-agua-acusan-apatia-de-autoridades>
- Tapia Barrita, A. (2018, 22 de febrero). Desabasto de agua en Salina Cruz, Oaxaca. *NVI Noticias*. <https://agua.org.mx/desabasto-agua-en-salina-cruz-oaxaca-nvi-noticias/>
- Tello Moreno, L. F. (2006). El acceso al agua potable: un derecho humano. *Revista Del Centro Nacional de Derechos Humanos*, (2), 101-123. <https://revistas-colaboracion.juridicas.unam.mx/index.php/derechos-humanos-cndh/article/view/5525/4872>
- Tirado, C. (2018, 11 de enero). Alud de fugas de agua en el sistema de la red de agua en Salina Cruz, por sismos. *El Piñero, Periodismo y Debate*. <https://www.elpinero.mx/alud-fugas-agua-sistema-la-red-agua-salina-cruz-sismos/>
- Totsuka, N., Trifunovic, N., & Vairavamoorthy, K. (2004). Intermittent urban water supply under water starving situations. *30th WEDC International Conference*, 505-512. <https://core.ac.uk/download/pdf/288365164.pdf>
- UN (2019). Water and Sanitation-United Nations Sustainable Development. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/water-and-sanitation/>
- WHO (2003). The right to water. https://www2.ohchr.org/english/issues/water/docs/Right_to_Water.pdf

