

Sistemas contra incendios para industria petrolera

Parte 3. Modelo detallado de red

Dr. Eric Cabrera Estupiñán

Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí ULEAM, extensión Chone, Ecuador.

e-mail: ecabrerae@gmail.com

Ing. Alejandro Alomá Barceló

Empresa de Ingeniería y Proyectos del Petróleo, EIPP, Habana.

e-mail: alobarca@yahoo.com

RESUMEN

En esta parte del trabajo se demuestra que sólo con la creación y aplicación de detallados modelos matemáticos de simulación del flujo a presión en tuberías se pueden evaluar con gran precisión, complejos escenarios dentro de las etapas de diseño o análisis de los Sistemas Contra Incendios (SCI) en la industria del petróleo. En tal sentido se propone el concepto de modelo detallado de red, que consiste en incorporar todos los elementos de la red importantes para simular la hidrodinámica del flujo vinculado con modelos de radiación térmica. Esto se logra mediante EPANET aprovechando a fondo (con ingenio) muchas de sus potencialidades y la herramienta MGpoolfire. Se mencionan varias aplicaciones, destacándose el caso del SCI de la Empresa Comercializadora de Combustibles (ECC) Matanzas.

Palabras clave: EPANET, MGpoolfire, modelo detallado de red, radiación térmica, sistemas contra incendios.

Oil industry fire extinguishing system design

Part 3. Detailed pipe network model

ABSTRACT

This part of the paper shows that only with the creation and implementation of detailed mathematical models for simulating pipe flow, high accuracy complex scenarios within the stages of design or analysis of Fire Extinguishing Systems (SCI) in the petroleum industry can be evaluated. In this regard, the concept of detailed pipe network model is proposed. This concept comprises incorporating all the important network elements to simulate the flow hydrodynamics linked to the thermal radiation models proposed. This is achieved by taking full advantage of many EPANET potentialities (to wit) and MGpoolfire tool. Several applications are listed, highlighting the case of the SCI for the Fuels Distributor Company (ECC) Matanzas.

Keywords: EPANET, MGpoolfire, detailed pipe network model, thermal radiation, fire extinguishing systems.

INTRODUCCIÓN

Desde sus inicios, la industria del petróleo ha sido un sector que ha presentado un alto riesgo de ocurrencia de incendios. En la actualidad son mayores los volúmenes de combustibles que se manejan en el mundo y si bien los avances en la ciencia y la técnica han estado encaminados a crear sistemas cada vez más seguros, los riesgos en la ocurrencia de incendio aún persisten. Por lo general cuando ocurren incendios en sectores de la industria de este tipo, las afectaciones son cuantiosas, desde el punto de vista económico, medioambiental e incluso para la vida de las personas. Este problema se agrava en el caso de países subdesarrollados que muchas veces no tienen los recursos necesarios para invertir en sistemas de alta tecnología, los que regularmente suelen ser muy costosos y su función es solamente la de proteger, o sea, no son parte del proceso de producción.

Cuba no se encuentra ajena a esta situación y en estos momentos en que la industria del petróleo en la isla vive una reanimación, todo avance tecnológico que implique reducción de costos, diseños eficientes, sustitución de importaciones y otros, es bien recibido. Gran responsabilidad tienen en este sentido los científicos e ingenieros que trabajan en todas las ramas de dicha industria.

El hecho de contar en Cuba con la Agencia de Protección Contra Incendios APCI, y el cuerpo de bomberos que son instituciones ampliamente reconocidas en la región por su alto nivel y profesionalidad es una verdadera fortaleza en el combate contra incendios en el país y fundamentalmente en la industria del petróleo.

Actualmente se realizan importantes diseños y evaluaciones de Sistemas Contra Incendios SCI en las instalaciones petroleras en Cuba. Estos diseños de grandes sistemas son esencialmente hidráulicos y se caracterizan por ser muy costosos. Para realizar dichos trabajos se han venido empleando por los especialistas, técnicas de simulación computacional que no permiten tener en cuenta toda la realidad física de las redes de los SCI, por ejemplo, no permiten simular simultáneamente las redes de agua y espuma, incluir elementos tan importantes como rociadores, cámaras de espuma, sistemas de suministro de líquido espumógeno, evaluación temporal del consumo de agua en la red y de la reserva, etc.

La situación planteada anteriormente pudiera parecer insignificante o quizás perfeccionista pero alejada de una realidad práctica que en la mayoría de las veces la ha superado. Este trabajo propone un novedoso concepto para la modelación matemática de las redes de los SCI, a la que se llamó modelo detallado de red. Bajo esta concepción se han realizado modelos para los SCI de importantes instalaciones de la empresa Cuba Petróleo CUPET.

SISTEMA CONTRA INCENDIOS EN GRANDES DEPÓSITOS DE COMBUSTIBLE

Una de las principales labores que se realiza en la industria del petróleo es la comercialización de los hidrocarburos, en esta tarea existen diferentes etapas dentro de la que se encuentra el almacenamiento de grandes cantidades de recursos combustibles. Este almacenamiento se realiza en instalaciones creadas al efecto y por lo general se emplean tanques cilíndricos de acero. Dichos tanques tienen que ser protegidos ante la posibilidad de un incendio, por eso se realizan SCI en estas instalaciones que tienen en cuenta todos los riesgos posibles.

Estos SCI (a grandes rasgos) constan generalmente de una reserva de agua, almacenada en tanques de acero apoyados en tierra o en cisternas, una estación de bombas que tiene equipos de bombeo principales, de reserva y un equipo para la presurización de la línea, redes de tuberías, generalmente de acero con diferentes diámetros y longitudes que permiten la circulación de agua y en un punto determinado de la red (cerca del objeto de riesgo) se diseña un ramal que entra a

un equipo (kit de espuma) que suministra un líquido espumógeno el cual es transportado por una tubería hasta el objeto de riesgo donde finalmente se genera la espuma usada para extinguir el fuego. La otra parte de la red que conduce agua también llega a los objetos de riesgo y en el caso de los tanques que almacenan combustibles se forman mallas circulares de tuberías de acero en las que se colocan aspersores para el enfriamiento de las paredes del tanque. También se ubican hidrantes de agua y espuma cerca de los objetos de riesgo, en algunos casos para cumplir la función de apoyo al sistema principal y en otros, ellos son el sistema de combate principal.

HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN DE REDES A PRESIÓN CON AGUA

Los especialistas que diseñan o revisan estos importantes sistemas en ocasiones emplean herramientas de simulación para realizar análisis hidráulicos del funcionamiento del sistema. En la Empresa de Ingeniería y Proyectos del Petróleo, EIPP en Cuba se venía usando por parte de los especialistas en Hidráulica el módulo de CIPECAD para el cálculo de redes hidráulicas a presión, sin embargo este sistema no permite considerar importantes elementos de la hidrodinámica del flujo en los sistemas que se analizan (Alomá 2013).

Por tal motivo se introduce el modelo EPANET que es un programa orientado al análisis del comportamiento de los sistemas de distribución de agua y el seguimiento de la calidad del agua en los mismos (IDMH 2002).

MODELO DETALLADO DE RED

Como su nombre indica se parte de considerar con detalle todos los elementos que repercuten en la hidrodinámica del flujo en los SCI. Se emplea el modelo EPANET debido a la gran fiabilidad en los resultados que brinda, a la calidad en su concepción, excelentes algoritmos de cálculo, buena interfaz gráfica, descarga libre, pocas prestaciones para su uso, etc.

Primeramente se puede partir de un levantamiento planimétrico y altimétrico de la red del SCI que por lo general se tiene en formato *.dwg del sistema AutoCAD, este esquema de red se analiza, prepara y finalmente se exporta para EPANET, por ejemplo empleando el programa EpaCAD. Una vez que la red se encuentre en EPANET se deben introducir todos los datos hidráulicos referentes a las tuberías, nodos etc.

Elementos especiales:

1-*Equipos de bombeo*: Se pueden definir en EPANET todas las bombas que conforman el sistema, las interconexiones entre ellas, sus curvas características, válvulas de retención, etc. y en el momento de la simulación se decide qué equipos están en funcionamiento.

2-*Depósitos*: Estos constituyen la reserva de agua del SCI, se define su interconexión a la red, a las bombas, se definen sus cotas y niveles y se pueden ubicar válvulas de regulación.

3-*Rociadores, cámaras de espuma e hidrantes*: Todos estos dispositivos físicos de la red tienen en común el hecho de que un chorro de agua pasa a través de un orificio contenido en ellos y en tal sentido existe una relación entre el caudal emitido por estos equipos y la presión a la que están sometidos. EPANET puede simular el efecto real de ellos mediante la declaración de nodos como emisores, los que responderán a la siguiente ecuación.

$$Q = K \cdot P^n \quad (1)$$

donde:

Q : Es el caudal expresado en L/s.

P : Presión expresada en mca.

n : Es un exponente que puede ser supuesto como 0,5.

K : Es un coeficiente normalmente llamado coeficiente del emisor.

Cada uno de los dispositivos antes mencionados tienen que ser probados en laboratorios y existen por lo tanto (en los catálogos de fabricantes) curvas de relación $Q - P$. Con esta información y la ecuación (1) se pueden obtener los valores de los coeficientes K para cada dispositivo y este es el que se introduce en el nodo en EPANET y convierte a un objeto nodo en un objeto emisor, el cual emitirá un caudal en función de la presión a la que se encuentre trabajando.

4-Platillos orificios: Son elementos imprescindibles en los SCI para la disminución brusca de la presión en puntos de la red. EPANET no tiene objetos para modelarlos, sin embargo se pueden emplear *válvulas de rotura de carga* a las cuales se le define como consigna la propia pérdida.

5-Equipo suministrador de líquido espumógeno: Se puede simular su efecto generador de pérdidas de energía mediante una *válvula de propósito general* a la cual se le asigna una curva de pérdidas de carga en función del caudal que circule por el equipo.

6-EPANET permite realizar *simulaciones en tiempo extendido*, esto significa que se puede ver de forma dinámica (variando en el tiempo) el comportamiento de los flujos y presiones en la red así como el vaciado de los depósitos (muy importante, evaluación de la reserva), consumos de agua reales en los aspersores, cámaras de espuma, hidrantes, monitores, etc.

7-Asignación de curvas de modulación de los consumos: Permiten variar los consumos de un nodo (hidrante u otro tipo de elemento) en el tiempo.

8-Leyes de control: En la estación de bombas del SCI existen bombas de incendio principales y de reserva, además existe una bomba llamada comúnmente Jockey la cual está diseñada para un pequeño caudal y una elevada carga, su función es mantener presurizada (siempre) la red de agua del sistema de enfriamiento. Cuando ocurre un incendio en un depósito existen sensores que lo captan y automáticamente actúan sobre válvulas (abriéndolas) y permitiendo que circule el agua del sistema de enfriamiento, esto provoca una caída de presión que sobrepasa los límites prefijados para la bomba Jockey y por lo tanto el sistema automático de arrancada de las bombas de incendio actúa encendiéndose cuantas bombas sean necesarias en función de las necesidades requeridas (caudales).

En el momento que se decida se acciona el sistema de extinción (suministrador de espuma) se abren las válvulas automáticas implicadas y comienzan a trabajar las cámaras de espuma, monitores, lanzas, etc. Esta actividad está prevista para el diseño en tres golpes de espuma de 10 minutos cada uno, de forma tal que en un momento del incendio solo funcionará el sistema de enfriamiento y en otro enfriamiento + extinción, este es precisamente el momento donde el flujo es mayor.

EPANET es capaz de simular todos estos eventos en el tiempo mediante *leyes de control*, las cuales trabajan bajo elementos condicionales, por ejemplo encender la bomba 1 si la presión en el nodo 25 es menor de 50 mca, abrir la válvula 4 si el tiempo es 30 minutos, etc. Además concibe un modelo único que integra las redes de agua y de espuma (como funcionan en la realidad).

Todos estos conceptos perfectamente articulados es a lo que se llama modelo detallado de red, con él se puede lograr simular (en el intervalo de tiempo que se quiera) el funcionamiento hidrodinámico de la red de incendio cuando ocurre un siniestro desde el inicio del mismo hasta su extinción. También se pudiera incluir la conexión de la reserva de agua del SCI a la fuente de suministro de agua que tiene la responsabilidad de completarla en menos de 24 horas.

Una versión mucho más acabada de este modelo detallado de red es el que se presenta aquí ya que se combina un modelo de radiación térmica (GMpoolfire) para la determinación de los criterios de vecindad entre tanques lo que permite cuantificar de una forma mucho más precisa el

flujo (agua) de todos los escenarios posibles de incendio, y el modelo detallado de red; los resultados del primero definen hasta cierto punto los escenarios que serán modelados desde el punto de vista hidráulico con el segundo. Estas dos herramientas combinadas permiten sentar sobre bases teóricas muy consistentes las soluciones que se puedan brindar en el análisis y diseño de estos SCI.

Es importante aclarar que el modelo detallado de red pudiera ser aplicado sin el empleo de un modelo de radiación térmica y sustentar la vecindad entre tanques por criterios prácticos como los analizados en las partes 1 y 2 de este artículo.

En la bibliografía consultada no se encuentra una herramienta semejante que modele con tanto nivel de detalle la hidrodinámica de las redes de SCI en la industria del petróleo. Por ejemplo en Kurashiki y Masaru (2008) se presenta un interesante programa de simulación incorporado a un Sistema de Información Geográfica SIG que permite calcular los efectos de evaporación, difusión del gas y radiación producidos en un incendio en un tanque dentro de una planta química, vinculado incluso con el sistema de extinción. Es muy interesante la estrategia para calcular el efecto de reducción del calor generado en tanques vecinos cuando se están enfriando pero no conciben un modelo hidráulico tan detallado como el que se presenta aquí.

CASOS DE ESTUDIO

Esta tecnología ha sido aplicada en un amplio grupo de proyectos de diseño y revisión de SCI en emplazamientos de una envergadura importante. A continuación se enumeran las aplicaciones y por razones obvias de espacio solamente se describirá una de ellas, en este caso la 3.

- 1- Sistema Contra Incendios del Centro Colector y la Batería Central de Puerto Escondido. Provincia Mayabeque, Cuba.
- 2- Sistema Contra Incendios de la Batería Central de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo, EPEP – Centro. Provincia Matanzas, Cuba.
- 3- Sistema Contra Incendios de la Empresa Comercializadora de Crudos, ECC-Matanzas. Provincia Matanzas, Cuba.
- 4- Sistema Contra Incendios de la Terminal de combustibles marinos del Mariel. Provincia Artemisa, Cuba. Ver detalles del modelo en Alomá (2013).
- 5- Sistema Contra Incendios para la nueva Base Almacén de gas licuado del petróleo ubicada en Nicaro. Provincia Holguín, Cuba.
- 6- Sistema Contra Incendios de la refinería de petróleo “Hermanos Díaz”. Provincia Mayabeque, Cuba. Ver detalles del modelo en Cabrera (2013).

SISTEMA CONTRA INCENDIOS DE LA EMPRESA COMERCIALIZADORA DE CRUDOS, ECC MATANZAS

La empresa comercializadora de Crudos ECC Matanzas se encuentra ubicada en la bahía de Matanzas en la provincia de igual nombre en Cuba. Es uno de los mayores emplazamientos en el país destinado a almacenar combustible, con una capacidad aproximada de 800 000 m³ donde resaltan 10 tanques con una capacidad cada uno de 50 000 m³. Además posee 5 muelles en los que pueden atracar barcos supertanqueros y están creadas todas las condiciones para su carga y descarga. En esta empresa se lleva a cabo una reparación capital de los depósitos de combustible, que incluye la modernización del Sistema Contra Incendio y el empleo de nuevas tecnologías en los tanques, en particular la instalación de los domos geodésicos de aluminio en las cubiertas. En la figura 1 se muestra una vista en planta de toda la instalación destacándose las diferentes áreas y estaciones de bombeo de sistemas contra incendio.

El objetivo en este caso es realizar una evaluación integral del funcionamiento hidráulico del SCI de toda la ECC Matanzas y proponer las soluciones necesarias para el completamiento de dicho sistema. Las soluciones brindadas aquí son vitales para un Estudio de Factibilidad Técnico Económica a realizar posteriormente. El principio de análisis del SCI es que solamente ocurrirá un incendio mayor (o de gran magnitud) a la vez en toda la ECC Matanzas.

La magnitud del trabajo a realizar es considerable, por tal motivo se decide dividirlo en dos etapas. Una primera etapa en la que se diseñan los sistemas de enfriamiento y extinción de todos los tanques definiéndose por ejemplo, cantidad y tipos de aspersores, cámaras de espuma, diámetros de tubería, etc. (hasta el pie de los tanques). En relación con los diámetros de tubería es importante señalar que su diseño (en esta etapa y en la ulterior) implica considerar velocidades hasta 3 m/s en el caso de tuberías en las que circule agua y hasta 2,5 m/s por las pertenecientes al sistema de espuma, Alomá (2013). Estas velocidades pudieran ser elevadas para un sistema de abasto de agua pero en el caso de estos SCI al no tener un funcionamiento continuo, el costo energético no es un factor determinante. Existen experiencias transmitidas por especialistas mexicanos que han considerado diseños con velocidades de hasta 5 m/s (Rodríguez 2013).

En la segunda etapa se concibe la conexión de todos los tanques y otros objetivos a proteger con la red del SCI. Los resultados de la primera etapa no se muestran detalladamente en este trabajo ya que sería demasiada información, estos son datos de entrada decisivos para la segunda etapa.

Situación actual de las redes del Sistema Contra Incendios de la ECC Matanzas

En la actualidad existen redes de tuberías de acero para agua que protegen a todos los tanques que almacenan combustible las que varían en diámetros nominales de 8" (200 mm), 12" (300 mm), 14" (350 mm), 16" (400 mm), 20" (500 mm).

Es importante destacar que existe una unión entre las mallas de agua del SCI de las zonas de (Base de crudo y suministro - Terminal 320 - Área de Bahía) con (Área de tanques de 5000 m³ - Área de residuales). Esta conexión es mediante una tubería de acero de 8" (200 mm) que tiene una longitud aproximada de 230 m.

Estaciones de bombeo y reserva de agua del SCI existente

Para dar servicio al SCI del área de tanques de 50000 m³ se ha construido una estación de bombeo compuesta por tres bombas rotodinámicas principales conectadas en paralelo, una o dos de trabajo (dependiendo del escenario de incendio) y una de reserva, accionadas todas por motor diesel con la mitad del flujo de diseño (peor escenario de incendio) y el 100% de la carga de diseño (cada una) es decir $Q=400$ L/s y $H=100$ mca y una bomba Jockey para presurizar la red. En lo adelante a esta estación de bombeo se le llamará Objeto 48. Esta estación de bombeo toma agua de dos cisternas de 1800 m³ cada una y de 2 tanques de 5000 m³ cada uno (TK 1.02 y TK 1.03), lo que constituye la reserva del sistema, ver esquema en la figura 2.

Por otra parte la zona de (Base de crudo y suministro - Terminal 320 - Área de Bahía) tiene una estación de bombeo de SCI llamada "estación de bombeo de la Terminal 320" la cual no se encuentra en funcionamiento, prácticamente está en un estado de desmantelamiento. Existe un tanque de 2000 m³ de capacidad que constituye la reserva de agua para incendios, ver su ubicación en la figura 1. A todas luces esta reserva de agua es insuficiente para asumir un incendio de una magnitud importante en esta zona. Es por eso que una parte importante del proyecto del SCI de la instalación concibe el diseño o rediseño de esta estación de bombeo.



- 1: Base de crudo y suministro
- 2: Terminal 320
- 3: Área de tanques de 5000 m³
- 4: Área de residuales
- 5: Área de bahía
- A: Estación de bombeo (Objeto 48)
- B: Estación de bombeo, Terminal 320

Figura 1. Empresa comercializadora de crudos de Matanzas, ECC Matanzas. Imagen extraída de Google Earth

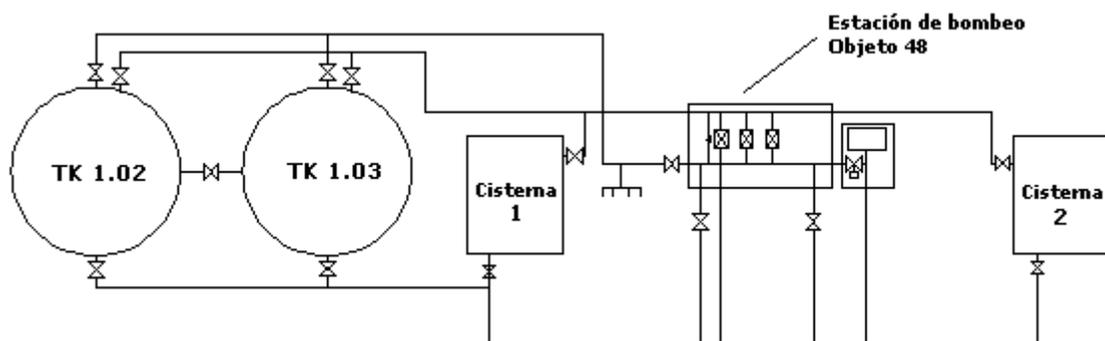


Figura 2. Esquema de la estación de bombeo del SCI destinado para el área de tanques de 50000 m³ (Objeto 48)

Sistemas fijos de suministro de líquido espumógeno y redes de espuma del SCI

En el caso del área de tanques de 50000 m³ existirán dos sistemas fijos de suministro de líquido espumógeno, los que fueron diseñados en proyectos anteriores de SCI para esta zona;

un sistema fijo para los tanques (TK-49 al TK-52) y el otro para los tanques (TK-53 al TK-56). De igual forma el Área de Residuales (donde se ubican los tanques TK-69-1, TK-69-2, TK-70-1 y TK-70-2) y el área de Bahía tendrán sus sistemas fijos de suministro de líquido espumógeno. Actualmente estas dos últimas áreas tienen un sistema móvil para la extinción de incendios.

En el área de Base de crudo y suministro, donde están los tanques TK-33 al TK-37, existe un equipo fijo de suministro de líquido espumógeno del cual salen ramales de 6" (150 mm) para cada uno de estos tanques (un ramal por tanque) para la extinción.

En la zona de la terminal 320 se encuentra otro kit de espuma que le brinda servicio a un grupo de tanques de esta área. El tanque TK-29, que tiene una capacidad de almacenamiento de 50000 m³, tiene su propio kit de espuma. De todos estos equipos salen tuberías para conducir el líquido espumógeno hacia los tanques a proteger.

Adecuaciones a realizarle al SCI de la ECC Matanzas. Propuesta de Sistemas fijos de suministro de líquido espumógeno y redes de espuma del SCI

En esta propuesta se eliminan todos los sistemas fijos de suministro de líquido espumógeno existentes, debido a que no se conocen sus parámetros de operación (presión de trabajo, caudales de operación, pérdidas de carga, etc.), tampoco se sabe el estado técnico actual de los equipos y en los diseños del SCI de varios de los tanques se consideran nuevas entradas (tuberías para espuma).

En Cabrera (2012b) se puede consultar el plano 1128.E.IB.H.06.17 donde se puede ver la cantidad, tipo, ubicación, conexiones y volúmenes de tanques para líquido espumógeno para los kit de espuma que se proponen como solución al SCI de la ECC Matanzas. En relación con las redes, en una gran cantidad de grupos de tanques se diseñan mallas cerradas para el sistema de espuma, ver planos correspondientes en la referencia Cabrera (2012b).

Escenarios de incendio más importantes

Escenario#1. Incendio en el tanque TK-29.

Se considera el enfriamiento y la extinción (esta última durante 55 min) del tanque incendiado, además se considera el enfriamiento de las paredes del tanque TK-27 y el enfriamiento de la mitad del tanque TK-28 y de la mitad del domo de dicho tanque.

Tanque (TK-29): 50000 m³

Diámetro: 74,10 m

Altura: 11,92 m

Producto: Petróleo crudo

Perímetro: 232,79 m

Área: 4312,47 m²

Tipo de techo: Fijo o domo geodésico (tipo de techo no decidido, problemas de redondez)

Escenario#2. Incendio en el tanque 37.

Se considera enfriamiento y extinción (esta última durante 55 min) del tanque incendiado, además se considera el enfriamiento de la mitad expuesta de los tanques TK-34 y TK-36.

Tanque (TK-37): 50000 m³

Diámetro: 60,50 m

Altura: 18,75 m

Producto: Petróleo crudo

Perímetro: 190,07 m

Área: 2875 m²

Tipo de techo: Fijo

En estos escenarios un elemento muy importante es la decisión de vecindad entre tanques, la que se obtiene de la aplicación del programa MGpoolfire, ver segunda parte de este artículo. Para cada uno de estos escenarios se calculan los flujos y volúmenes de agua y líquido creador de espuma (teóricos) necesarios. La tabla 1 muestra estos resultados donde: T29-V27-V28

significa: escenario en el que el tanque incendiado es el TK-29 y los tanques TK-27 y TK-28 son vecinos. *SE*: Solución de espuma, *ETI*: Enfriamiento de tanque incendiado, *ETV*: Enfriamiento de tanque vecino, *CATE*: Caudal adicional para los trabajos de apoyo a la extinción (también se conoce como caudal de agua para el enfriamiento de tuberías, protección del personal y otros riesgos), *CTA*: consumo total de agua, *Rat*: Reserva de agua total.

Tabla 1. Principales escenarios de incendio

Escenario	Extinción (L/s)		ETI (L/s)	ETV (L/s)	CATE (L/s)	CTA (L/s)	Rat (m ³)
	SE (L/s)	Agua (L/s)					
T29-V27-V28	314,40	305	211	221	30	767	6012
T37-V34-V36	198	192,06	166	100	30	389	3851

Modelo matemático detallado de red del SCI de la ECC Matanzas

Para cumplir con el objetivo propuesto se impone realizar un modelo matemático de toda la red de la ECC Matanzas. Primeramente se realizó un levantamiento topográfico de todas las redes y elementos del SCI. Todos estos datos fueron procesados y se crearon las bases para EPANET. En la figura 3 se muestra el modelo creado en EPANET que tiene un total de 8084 tuberías. Una vez que se tiene un dominio de toda la red se pueden comenzar a realizar simulaciones, las que corresponderán a diferentes escenarios de incendio. En tal sentido se evaluaron las siguientes ideas:

- La estación de bombas del SCI del área de tanques de 50000 m³ (Objeto 48) existe, está en funcionamiento y consta de bombas de altos parámetros hidráulicos, entiéndase carga y capacidad. ¿Será posible que esta estación de bombeo desde el punto de vista hidráulico pueda asumir además incendios en las zonas de Base de crudo y suministro, Terminal 320 y Área de bahía? Si esta idea se verifica se estaría demostrando (desde el punto de vista hidráulico) que la estación de bombeo del SCI de la Terminal 320 no es necesaria y que el Objeto 48 podrá asumir cualquier incendio en la instalación.

- De no ser posible la opción anterior, determinar las características de las bombas del SCI a colocar en la zona de la estación de bombas de (Base de Crudo- terminal 320 - Área de Bahía). Para este caso también será necesario evaluar varios escenarios de incendio. En cualquiera de estas dos variantes se propone sustituir la tubería existente de 8" (200 mm) de diámetro que une a las áreas de (Base de crudo y suministro- Terminal 320 - Área de Bahía) con (Área de tanques de 50000 m³ - Área de residuales) por una de 16" (400 mm) y además crear una nueva conexión entre estos sistemas con una tubería de 20" (500 mm), ver figura 3. Esto permitirá que si la solución definitiva es que el Objeto 48 le brinde servicio a toda la instalación, el flujo podrá pasar de la malla de los Tanques TK-49 al TK-52 hacia la zona (Base de crudo y suministro- Terminal 320 - Área de Bahía) con parámetros correctos, entiéndase velocidades de flujo menores de 4 m/s en las tuberías y pérdidas de energía menores, lo que contribuye con mantener una mayor presión en las líneas y por lo tanto aprovechar mejor la carga de las bombas. Si la solución fuera incluir la estación de bombas de la Terminal 320, sería conveniente que ambos sistemas de bombeo, además de dar servicio a sus áreas, colaboraran en un momento dado (apoyo) ante una falla u otra situación que pudiera ocurrir en el sistema principal del área, esto solo sería factible con un tránsito adecuado del flujo entre estas áreas tal y como se propone.

Escenarios, ejecuciones del modelo y resultados obtenidos

Todas las ejecuciones del modelo se realizan en tiempo extendido, simulándose 3 horas de incendio a intervalos de 5 minutos. En los primeros 55 minutos se realizan las operaciones de extinción y enfriamiento, el resto del tiempo sólo se analiza el enfriamiento.

Los escenarios 1 y 2 coinciden con los definidos anteriormente y en ellos se evalúa con el modelo de simulación la utilización del Objeto 48 en el funcionamiento del sistema.

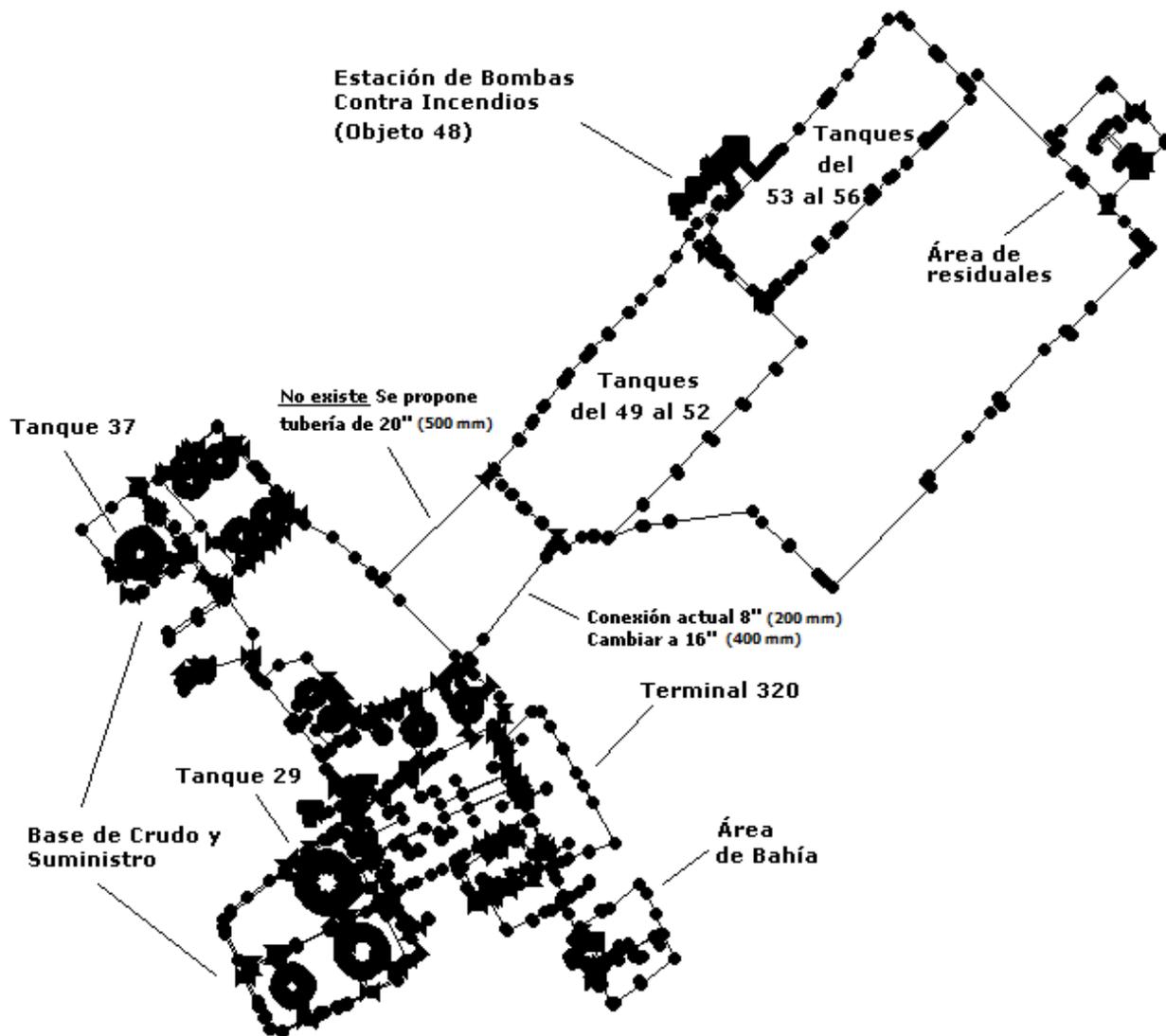


Figura 3. Modelo detallado de red en EPANET- SCI de la ECC Matanzas

Se tomaron estos dos escenarios de incendio como los más importantes en las zonas de (Base de crudo y suministro- Terminal 320 - Área de Bahía) ya que en el caso del escenario 1 (tanque TK-29 incendiado y a enfriar el TK-27 y TK-28) el consumo de agua era el más importante, no habiendo, a priori, tantos problemas con las presiones ya que la diferencia de nivel entre la estación de bombeo (cota 31,43 m en el eje de las bombas) y el tanque TK-29 (cota 13,70 m en la base del tanque) es de 17,73 m. El escenario 2 (tanque TK-37 incendiado), si bien no se caracteriza por demandar un caudal tan elevado como el escenario 1 existe la preocupación de que el sistema de bombeo garantice las presiones necesarias en las cámaras de espuma (40 – 45 mca) y aspersores, no hay que olvidar que existe una pérdida de energía producida por

los equipos de suministro de espuma que varía en función del caudal. La cota a la que se encuentra la base del tanque TK-37 es 44,01 m.

Resultados de la simulación (Escenario 1)

Los resultados fueron positivos, las presiones en las cámaras de espuma se comportaron alrededor de los 43 mca, valor aceptable pero no dejó de causar asombro ya que se esperaba un valor superior debido al gran desnivel existente (mencionado anteriormente), sin embargo, esta variante consume un elevado flujo (845 L/s a los 20 minutos de iniciado el incendio) lo que incrementa las pérdidas de energía considerablemente, además los equipos suministradores de líquido espumógeno generan una pérdida de 14 mca. En la figura 4 se muestran resultados gráficos de la simulación en la zona del tanque incendiado, después de 20 minutos de iniciado el incendio, por lo tanto en ese instante se está extinguiendo y enfriando el TK-29 y se está enfriando el TK-27 y la mitad del TK-28.

Los objetos con forma de rombo que cubren los tres anillos de enfriamiento son los aspersores y la presión que hay en ellos se puede analizar con la escala de colores que se muestra.

Se simuló platillos orificio en las entradas a los anillos de enfriamiento, en el caso del tanque TK-29 imponiéndose reducciones de presión de 15, 40 y 45 mca en los anillos superior, medio e inferior respectivamente. En el caso del tanque TK-27 las reducciones fueron de 30 y 45 mca en las entradas a los anillos superior e inferior respectivamente y en el caso del tanque TK-28 las reducciones fueron de 25 y 45 mca en las entradas a los semianillos superior e inferior respectivamente.

Con estas reducciones de presión se persigue el objetivo de que los aspersores trabajen cerca de su presión de diseño. En el caso de los aspersores que se colocan en los anillos o semianillos superiores es de 25 mca, presión a la cual proporcionan un caudal de 0,96 L/s y en el caso de los intermedios e inferiores 15 mca, con lo que se obtiene un caudal de 0,36 L/s.

Lograr estos valores de presión exactamente, así como distribuir uniformemente la presión en los aspersores es prácticamente imposible, más aún cuando se detiene la extinción y disminuye por ende el caudal total del sistema, destinándose este sólo al enfriamiento de los tanques. Cuando esto ocurre se experimenta un aumento de presión en los aspersores ya que el sistema de bombeo (dos bombas trabajando en paralelo) sigue funcionando bajo estas condiciones y al disminuir el gasto total del sistema esto se revierte en un aumento de la presión en los aspersores y por ende en un aumento del flujo en estos dispositivos.

En la figura 5 se presenta un gráfico con dos series, la primera representa la variación del caudal total “simulado real” (proporcionado por las 2 bombas principales trabajando en paralelo) con el tiempo, véase que en los primeros 55 minutos el caudal es mayor que en el resto del tiempo ya que se está enfriando y extinguiendo al unísono, después se reduce considerablemente el flujo quedando sólo el enfriamiento, esto se logra incluyendo leyes de control que inhabilitan las válvulas con que se simulan los equipos de suministro de espuma a partir de ese tiempo. Esta curva va teniendo un ligero descenso ya que los niveles en los depósitos de succión van disminuyendo paulatinamente.

La segunda serie son los valores “teóricos” de caudales. La diferencia entre caudal real simulado y teórico es que en el caso del primero se obtiene de la simulación de EPANET teniendo en cuenta el caudal real que sale por los dispositivos (aspersores, hidrantes y cámaras de espuma). Este caudal no es fijo, varía con la presión según la ecuación 1, y el caudal teórico del sistema se obtiene imponiendo el caudal nominal o de diseño de cada dispositivo, por ejemplo, se colocan aspersores de flujo nominal o de diseño de 0,96 L/s y 0,36 L/s.

La diferencia entre ambas series es apreciable, sobre todo cuando sólo se están enfriando las

paredes de los tanques ya que en este caso los aspersores trabajan a presiones superiores, entre 40 y 50 mca como se explicó anteriormente y esto provoca un aumento del flujo en estos dispositivos y en el sistema, comparado con los valores teóricos.

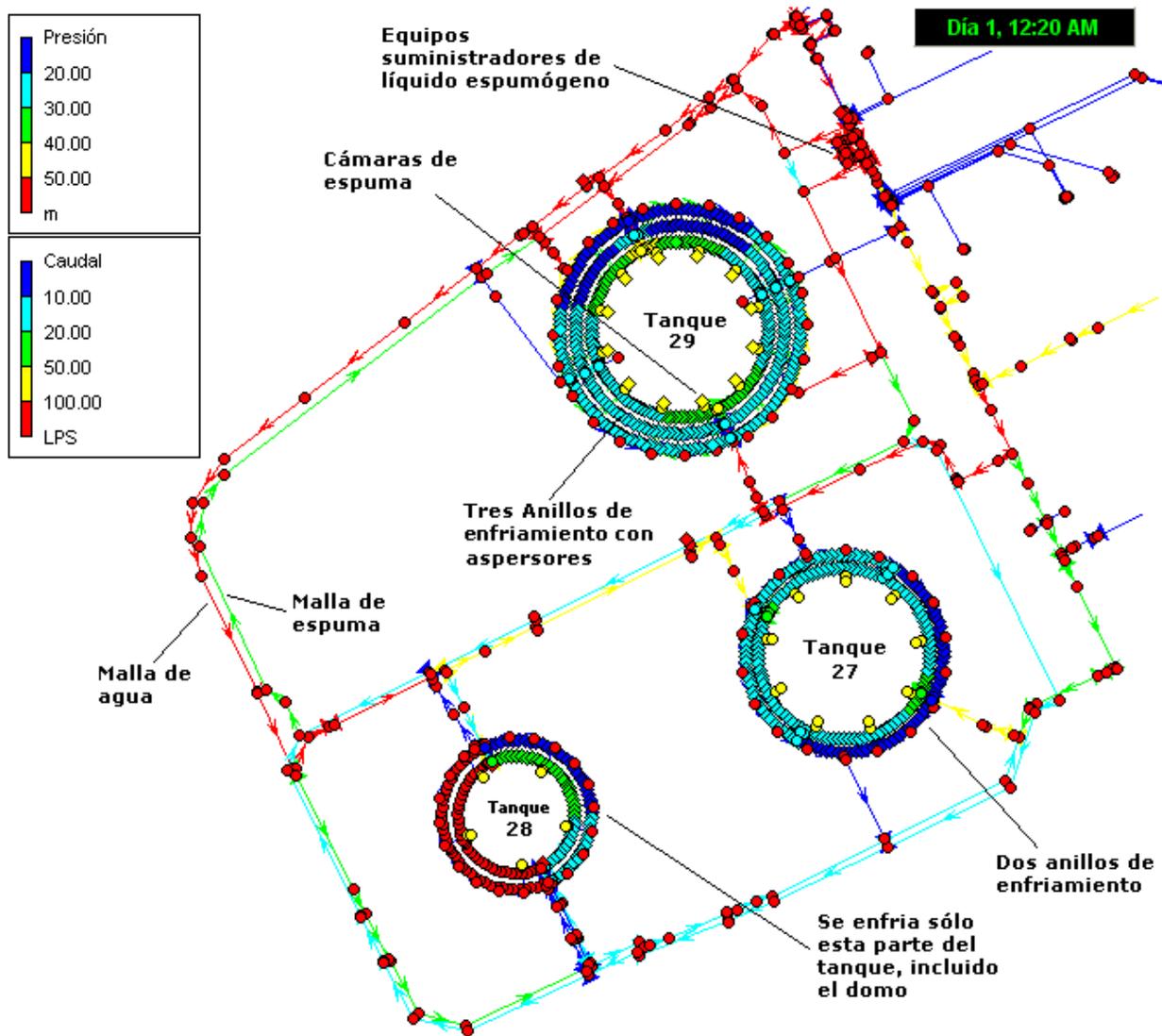


Figura 4. Estado de la simulación-variante 1- 20 minutos después de iniciado el incendio

Resultados de la simulación (Escenario 2)

En este caso los resultados también fueron positivos, a pesar del desnivel adverso en que se encuentran estos tanques en relación con las bombas, se logra garantizar presiones en las cámaras de espuma por encima de los 45 mca. Hay que tener en cuenta que en este caso el caudal demandado por el sistema es mucho menor que en el escenario anterior, 555 L/s, lo que hace que las pérdidas de energía no sean tan elevadas. Para este escenario también se obtuvieron gráficos al estilo de los presentados en la figura 4 y figura 5, ver la referencia Cabrera (2012a).

Para ambos escenarios se realizan gráficos de variación de los niveles de agua en la reserva a medida que transcurre el tiempo (evaluación de la reserva del SCI), esa es una de las salidas importantes del modelo propuesto. En estos casos después de transcurridas las 3 horas de

consumo todavía queda agua en los tanques (630 m^3 en cada uno) y las cisternas sólo han perdido alrededor de un metro de altura, quedando por lo tanto un volumen de $1410,50 \text{ m}^3$ en cada una, ver Cabrera (2012a).

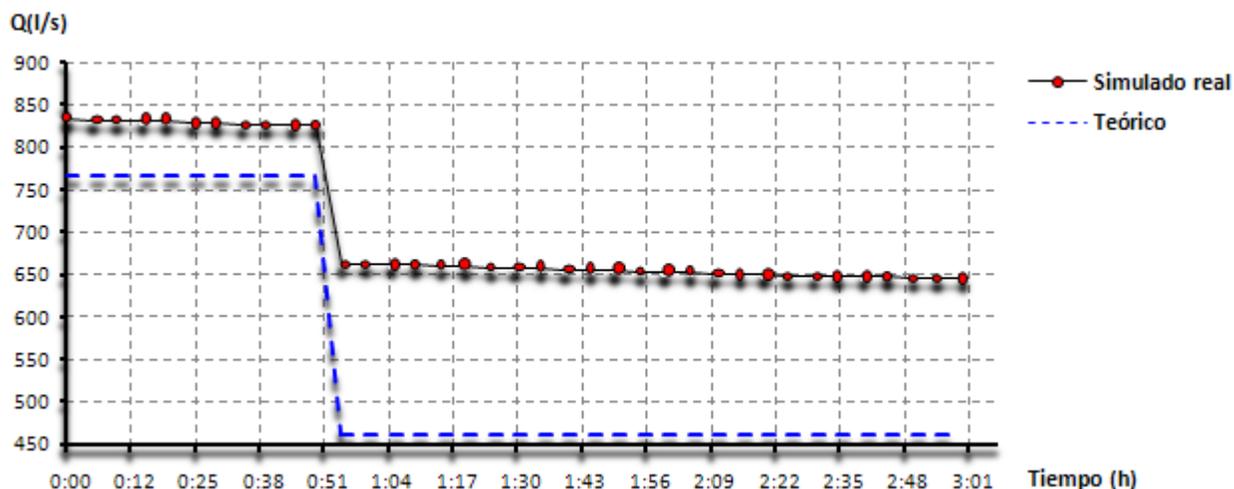


Figura 5. Caudales producidos por dos bombas del SCI- escenario 1

Otros escenarios

Una vez que se tiene el modelo detallado de red se pueden analizar muchos escenarios y variantes, en este caso se evaluó el Área de Bahía, el Área de Residuales y se simuló la existencia de la estación de bombeo de la terminal 320 con la necesaria ubicación de un tanque para almacenamiento de agua de acero de 5000 m^3 que se une al ya existente de 2000 m^3 para conformar la reserva necesaria. Las bombas para que este sistema asuma los incendios más críticos (escenarios 1 y 2) son similares a las del Objeto 48. Con estas bombas se obtiene una presión de 43,40 mca en las cámaras de espuma del tanque TK-37 a los 20 minutos de iniciada la simulación.

ANÁLISIS ECONÓMICO

Para la realización del proyecto de SCI de la ECC Matanzas la Agencia de protección contra incendios APCI emitió (como es usual) un grupo de requerimientos técnicos que en cierta forma orientan el trabajo de los especialistas. Dentro de estos requerimientos se encontraba el rediseño de la estación de bombas del SCI de la Terminal 320, además la inclusión de un tanque de 5000 m^3 que se adicionaría al ya existente de 2000 m^3 para completar la reserva. Es interesante e incluso lógico que de igual manera los directivos y técnicos de la ECC Matanzas también creyeran necesaria esta estación de bombas. Sin embargo con este estudio ha quedado demostrado que (desde el punto de vista hidráulico) la estación de bombas existente (Objeto 48) es capaz de asumir correctamente todos los escenarios de incendio de la ECC Matanzas, solamente se necesita aumentar el diámetro nominal de 8" (200 mm) a 16" (400 mm) de la tubería existente que une a las zonas (Área de crudo y suministro – Terminal 320 – Área de bahía) y (Área de tanques de 50000 m^3) e incluir otra conexión de 20" (500 mm) entre estas zonas, ver figura 4. Si la decisión fuera construir una estación de bombas para el SCI en la Terminal 320, también se debe potenciar la conexión entre las zonas (Área de crudo y suministro – Terminal 320 – Área de bahía) y (Área de tanques de 50000 m^3) así que este aspecto no se debe tomar en cuenta en la comparación económica de alternativas.

Estos resultados no se hubieran podido alcanzar sin la aplicación de una herramienta como MGpoolfire como soporte para la definición de vecindad entre tanques y especialmente la creación de un modelo detallado de red del SCI basado en una tecnología como EPANET que permite (con algo de ingenio) simular la gran mayoría de los dispositivos y fenómenos hidrodinámicos que ocurren en el sistema.

Para tener una idea del ahorro que se alcanza, producto de no tener en cuenta la estación de bombas del SCI de la Terminal 320, el costo de las tres bombas de incendio y la bomba Jockey del Objeto 48 ascendió a 708 249 euros y un tanque de acero de 5000 m³ de capacidad cuesta aproximadamente unos 842 040 euros, lo que suma más de 1 550 000 euros. Además el costo del montaje de un tanque de este tipo es de unos 700 000 CUP con componente en divisa y un tiempo de duración de alrededor de 4 meses. En este análisis no se han incluido los costos de otros equipos y accesorios como válvulas de accionamiento manual y automático, tuberías, equipamiento automático, costos de construcción, de montaje y otros adicionales.

CONCLUSIONES

- Se propone el concepto de “Modelo detallado de red” para los SCI de la industria del petróleo, que consiste en incorporar de forma detallada toda la geometría de la red así como los elementos importantes para simular la hidrodinámica del flujo en un modelo como EPANET. Además se incluye la herramienta MGpoolfire para el cálculo de la radiación térmica la que se emplea con el objetivo de definir la vecindad entre tanques. Este modelo detallado de red incluye:

- 1- Esqueletización precisa de la red del SCI incluyendo los tanques.
- 2- Modelación al unísono de la red de agua y la de espuma.
- 3- Modelación de todos los depósitos, bombas y válvulas que conforman el SCI.
- 4- Modelación de los equipos suministradores de espuma, hidrantes, cámaras de espuma, etc.
- 5- Modelación de aspersores en los sistemas de enfriamiento del tanque incendiado y de los vecinos.
- 6- Modelación de platillos orificio para propiciar una caída controlada de la presión.
- 7- Definición de leyes de control
- 8- Simulación en periodo extendido (régimen quasi-impermanente).

- En la bibliografía consultada no se encuentra una herramienta semejante que modele con tanto nivel de detalle la hidrodinámica de las redes de SCI en la industria del petróleo y que además incluya el análisis de radiación como base para la definición de vecindad.

- Queda demostrado que sólo con la creación y aplicación de detallados modelos matemáticos para la simulación de redes a presión de los SCI se pueden evaluar complejos escenarios que en el caso del SCI de la ECC Matanzas permiten dar una solución que implica un ahorro a la economía del país por concepto de reducción de costos de más de 1 550 000 euros (un millón quinientos cincuenta mil euros).

RECOMENDACIONES

-Establecer EPANET como modelo de cálculo de redes hidráulicas de los Sistemas Contra Incendio SCI en la Empresa de Ingeniería y Proyectos del Petróleo (EIPP).

-Los análisis y diseños de SCI que se realicen en emplazamientos de grandes dimensiones, como los que se presentan aquí deben realizarse con un modelo detallado de la red similar al propuesto, detallándose al menos los escenarios que definen carga y caudal del sistema.

-Desde el punto de vista empresarial, los modelos creados en EPANET pudieran ser un

producto más a comercializar por la EIPP (producto de ingeniería). Con estos modelos los usuarios tendrían un control del sistema que manejan a diario, podrían realizar nuevos análisis y crear nuevos escenarios. Los aportes y propuestas realizados en este trabajo emplean técnicas de modelación que son de las mejores en el mundo y sus resultados son perfectamente aplicables a todas las instalaciones petroleras del país, incluso a las instalaciones similares en la gran mayoría de los países.

RECONOCIMIENTOS

Se realiza un reconocimiento especial a los siguientes especialistas de la Empresa de ingeniería y proyectos del petróleo de Cuba EIPP, que contribuyeron de una forma importante para la realización de este estudio: Ing. Ileana Rodríguez Ordaz, Ing. Alejandro Omar Cueto Alonso, Ing. Daismel Díaz Domínguez, Ing. Angel Echevarría Roque.

Se reconocen los aportes y consejos del especialista de la Agencia de protección contra incendios APCI de la Habana: Ing. Felipe J. Bustamente García.

También a las autoridades de la Empresa de ingeniería y proyectos del petróleo de Cuba EIPP, del Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH) de la CUJAE, Cuba y de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, extensión Chone, Ecuador.

REFERENCIAS

- Alomá B. A.** (2013). “Integración de modelos para el cálculo de la radiación térmica y del flujo a presión en redes de tuberías para el diseño de Sistemas Contra Incendios en la industria del petróleo”. Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería Civil. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Habana, Cuba.
- Cabrera E.** (2012a) “Impacto de la simulación hidráulica en el análisis de redes de Sistemas Contra Incendios para la industria del petróleo”. Resultado científico – técnico presentado en opción al premio nacional a la innovación tecnológica 2012. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente CITMA. La Habana, Cuba.
- Cabrera E.** (2012b) “Proyecto de Ingeniería básica IB para el Estudio de factibilidad técnico económica EFTE de la red del Sistema contra incendios de la ECC Matanzas”. Proyecto con código 1128.E.IB.H.06.00. Empresa Ing. y Proyectos del Petróleo (EIPP), La Habana, Cuba.
- Cabrera E.** (2013) “Proyecto de Ingeniería básica IB para el Estudio de factibilidad técnico económica EFTE del Sistema de detección de incendios SADI en la refinería Hermanos Díaz”. Proyecto con código 1283.R.IB.H.01.00. Empresa de Ingeniería y Proyectos del Petróleo EIPP. La Habana, Cuba.
- IDMH** (2002) “EPANET 2.0 en Español. Análisis hidráulico y de calidad de redes de distribución de agua”. Manual de usuario. Grupo IDMH, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Kurashiki T. and Masaru Z.** (2008). “Disaster simulation in chemical plants considering diffusion of gas and heat radiation from tank fire”. The 14th World Conference on Earthquake Engineering. October 12-17, 2008, Beijing, China.
- Rodríguez O. I.** (2013). “Comunicación personal”. Empresa de ingeniería y proyectos del petróleo, EIPP, La Habana, Cuba.