

## Sistemas contra incendios para industria petrolera Parte 2: Modelos de radiación térmica

Dr. Eric Cabrera Estupiñán  
Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí ULEAM, extensión Chone, Ecuador.  
e-mail: [ecabrerae@gmail.com](mailto:ecabrerae@gmail.com)

Ing. Alejandro Alomá Barceló  
Empresa de Ingeniería y Proyectos del Petróleo, EIPP, Habana.  
e-mail: [alobarca@yahoo.com](mailto:alobarca@yahoo.com)

### RESUMEN

En la primera parte de este trabajo se realiza un análisis crítico de los principales modelos que existen en la literatura para el cálculo de la radiación térmica generada por un incendio en un tanque de almacenamiento de combustible, elemento fundamental para definir la vecindad entre tanques. En la presente contribución se presenta una herramienta computacional creada por los autores y llamada GMpoolfire que tiene implementada los modelos de fuente puntual MFP y de llama sólida MLLS. Esta herramienta se aplica a varios casos de estudio lo que sirve de base para la definición de la vecindad entre tanques y posibles escenarios de incendios. Los resultados aquí obtenidos son empleados en la tercera parte del trabajo para la ejecución del llamado modelo detallado de red.

**Palabras clave:** incendio en tanques, MGpoolfire, modelo detallado de red, radiación térmica.

## Oil industry fire extinguishing system design Part 2. Thermal radiation models

### ABSTRACT

In the first part of this paper a critical analysis of the main models existing in the literature to calculate thermal radiation from a large pool fire “atmospheric tank fire” (a fundamental element to define the neighborhood between tanks) is performed. In this contribution a computational tool created by authors and called GMpoolfire with implementation of the point source model and surface emitter model is presented. This tool is applied to several case studies which serve as the basis for defining the neighbor tank criterion and fire scenarios. The results obtained are used in the third part of the paper for the implementation of the so called detailed pipe network model.

**Keywords:** atmospheric tanks fire, MGpoolfire, detailed pipe network model, thermal radiation.

## INTRODUCCIÓN

No son muchos los programas que existen en el mercado para la determinación de la intensidad de radiación térmica incidente en un objeto producto de un incendio tipo charco (pool fire). Muchas veces los que existen son costosos y no tienen un enfoque dirigido a los proyectos de sistemas contra incendios (SCI) en la industria del petróleo ni tampoco están orientados a definir el importante criterio de vecindad entre tanques, enfocándose mucho más a la protección de las personas, Alomá (2013).

En tal sentido se pueden nombrar programas como EFFECTS 9.0 que es una herramienta muy completa y moderna con la que se pueden calcular efectos físicos (como concentración de gas, niveles de radiación térmica, sobrepresiones, etc) debido al escape de sustancias peligrosas TNO (2014) y (González et al. 2002). Este programa emplea los modelos descritos en el famoso Yellow Book y que son analizados con detalle en la primera parte del artículo e implementados en la propuesta que se describe en lo adelante. EFFECTS 9.0 está equipado con un Sistema de Información Geográfica (SIG) interno que le permite a los usuarios presentar los resultados de los cálculos sobre mapas temáticos. También existe el programa ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) con el que se pueden modelar importantes fenómenos peligrosos para las personas, bienes y el medio ambiente, resultado del escape de productos químicos que producen la dispersión de gases tóxicos, fuegos y explosiones.

En Bustamante (2012) se presenta un programa para el cálculo del flujo de calor de radiación partiendo de un incendio de tipo charco (pool fire). Aquí se conciben los modelos de fuente puntual MFP y de llama sólida MLLS, sin embargo el programa no está enfocado a los proyectos de ingeniería de sistemas contra incendios ya que le faltan herramientas de análisis espacial para delimitar zonas de intensidad de radiación y vecindad entre tanques.

Por todo lo dicho anteriormente y con la información recabada de la primera parte de este trabajo, así como de las experiencias en los programas EFFECTS 9.0, ALOHA y el presentado en Bustamante (2012), se decide crear una herramienta computacional a la que se llama GMpoolfire. Este programa utiliza los MFP y MLLS y tiene herramientas de Sistemas de Información Geográfica con las que se pueden hacer importantes análisis espaciales que permiten enfocar los resultados a los proyectos de sistema contra incendio. GMpoolfire es de fácil manejo por los usuarios y fue creado para suplir las necesidades de los especialistas de la Empresa de Ingeniería y Proyectos del Petróleo (EIPP) de Cuba encargados de realizar los diseños y análisis de SCI para la industria del petróleo. En tal sentido el programa y su aplicación están orientados a la definición del importante criterio de vecindad entre tanques.

En esta segunda parte del trabajo se realizan varias aplicaciones del programa propuesto a importantes emplazamientos relacionados con la industria del petróleo en Cuba. Con estas aplicaciones se definen los criterios de vecindad entre tanques y los diferentes escenarios de incendio para cada proyecto. Los resultados aquí obtenidos son empleados en la tercera parte del trabajo para la ejecución del llamado modelo detallado de red.

## SOFTWARE MGPOOLFIRE

MGpoolfire es una herramienta informática con una interfaz de usuario amigable y con una concepción enfocada a las necesidades de los proyectos de sistemas contra incendios, en los que el análisis espacial juega un papel fundamental. En ese sentido el programa permite importar imágenes raster georreferenciadas de tipo \*.jpg, \*.tif y \*.png, además de ficheros vectoriales de tipo \*.shp. Sobre esta cartografía base se vuelcan los resultados gráficos referentes a los niveles

de intensidad de radiación producida por un tanque en combustión. En la etapa final se realiza el análisis correspondiente para definir los tanques vecinos del tanque incendiado.

El software ha sido programado en el asistente matemático MATLAB empleando una interfaz gráfica de usuario y no es necesario tener profundos conocimientos del fenómeno de radiación térmica para su aplicación.

### Características del programa

MGpoolfire tiene incorporado los modelos de fuente puntual MFP y el modelo de llama sólida MLLS con las variantes de calma (es decir, sin viento) y con viento. En este sentido el usuario elige cuál de los modelos desea utilizar.

En la figura 1 se muestra la ventana principal del programa y a continuación se realiza una explicación de todas sus herramientas componentes.



Figura 1. Ventana principal del programa MGpoolfire

- 1- *Visor de mapas:* Es la zona donde se ubican las imágenes en formatos raster georeferenciadas de tipo \*.jpg, \*.tif y \*.png, también mapas vectoriales en ficheros \*.shp. Además aquí se visualizan los resultados gráficos de las simulaciones, por ejemplo isolíneas de igual intensidad de radiación térmica, las que se grafican en forma de anillos alrededor del diámetro del tanque, disminuyendo sus valores a medida que el objetivo se aleja del tanque incendiado. Sobre esta zona se pueden aplicar las herramientas 9 y 11.

- 2- *Modelo de fuente puntual (MFP)*: Cuando se presiona se realizan los cálculos asociados a este modelo. Para consultar los detalles del modelo, ver la primera parte del trabajo.
- 3- *Modelo de llama sólida (MLLS)*: Cuando se presiona se realizan los cálculos asociados a este modelo. Para consultar los detalles del modelo, ver la primera parte del trabajo.
- 4- *Acceder y seleccionar los datos de la sustancia contenida en el tanque incendiado*: Para emplear GMpoolfire es muy importante definir un grupo de datos de la sustancia que contiene el depósito a modelar. Primeramente el nombre de la sustancia, después su densidad expresada en  $\text{kg/m}^3$ , seguidamente la entalpía de combustión expresada en  $\text{kJ/kg}$  y finalmente el caudal másico evaporado expresado en  $\text{kg/m}^2\text{s}$ . Estos datos pueden ser introducidos directamente o se puede acceder a una base de datos de sustancias que comúnmente se manejan en la industria petrolera y la idea es que los usuarios editen esta base de datos para introducir los datos de nuevas sustancias, modificar propiedades de sustancia existentes, etc. En tal sentido en programa viene con una base de datos de sustancias muy completa extraída de McGrattan et al. (2000). Mediante el botón “Sustancia” se consigue acceder a esta base de datos, ver figura 2. Una vez que se acepta la sustancia seleccionada, sus datos se muestran en la ventana principal del programa, ver figura 1.

	nombre	densidad(kg/m <sup>3</sup> )	entalpia de comb.(kJ/kg)	Caudal másico evap(kg/m <sup>2</sup> s)
10	Crude Oil	NaN	42600	0.0450
11	Cumene	NaN	41200	0.1320
12	Cyclohexane	NaN	43500	0.1220
13	No. 2 Diesel Fuel	NaN	39700	0.0350
14	Ethyl Acetate	NaN	23400	0.0640
15	Ethyl Acrylate	NaN	25700	0.0890
16	Ethyl Alcohol	NaN	26800	0.0150
17	Ethyl Benzene	NaN	40900	0.1210
18	Ethyl Ether	NaN	33800	0.0940
19	Fuel Oil 650 cSt	995.9000	39800	0.0350
20	Gasoline	NaN	43700	0.0550

**Figura 2. Ventana para la selección de la sustancia, programa Mgpoolfire**

- 5- *Diámetro del tanque (m)*: El programa modela solo tanques cilíndricos verticales, por lo que la superficie incendiada estará definida por el diámetro del depósito.
- 6- *Humedad relativa ambiental (%)*: Es un dato atmosférico.
- 7- *Temperatura ambiente (°C)*: Es un dato atmosférico.
- 8- *Coordenadas del centro del depósito incendiado*: Este valor es muy importante porque en este punto se ubica el centro de los anillos de radiación asociados al tanque incendiado.
- 9- *Herramientas de zoom in, zoom out, zoom extent y pan*: Estas son herramientas clásicas de un visor de mapas en un Sistema de Información Geográfica (SIG). En este sentido es importante decir que la plataforma MATLAB tiene una caja de herramientas llamada Mapping toolbox que posee un grupo de funciones asociadas a los SIG y varias de ellas han sido empleadas en esta aplicación, ver Matlab (2014).

- 10- *Cargar planos e imágenes georreferenciadas*: Con esta herramienta se pueden cargar imágenes en formatos raster georreferenciadas de tipo \*.jpg, \*.tif y \*.png, las que son muy empleadas en este tipo de trabajo de ingeniería como imágenes de fondo. Sobre estas se pueden incorporar mapas vectoriales en formato \*.shp.
- 11- *Limpieza del visor de mapas*: Con esta herramienta se elimina toda la información que se encuentra en el espacio “Visor de mapas”.
- 12- *Selección de salidas gráficas*: El usuario tiene la posibilidad de introducir tres valores de intensidad de la radiación térmica en ( $\text{kW/m}^2$ ) con los cuales se definen zonas con diferentes niveles de seguridad, zona roja, zona naranja y zona amarilla, ver figura 1. Además existe la posibilidad de realizar gráficos de isolíneas basados en: a) Equidistancia medida desde la pared del tanque, b) Equidistancia de intensidad de radiación térmica.

## APLICACIONES DE MGPOOLFIRE

### Determinación del criterio de vecindad entre los depósitos de la terminal de combustibles marinos del Mariel

La Terminal de combustibles marinos de Mariel será una de las instalaciones que forme parte de la Zona Integral de Desarrollo de la Bahía de Mariel, ubicada en el litoral norte de la provincia Artemisa y hacia el oeste de la provincia La Habana en Cuba. Esta zona está llamada a ser de una importancia vital para el desarrollo futuro del país.

La terminal de combustibles juega un papel decisivo desde el punto de vista logístico para toda la zona de desarrollo. Desde este lugar se suministra combustible a las plataformas de exploración, se almacena y se abastece de combustible a las demás instalaciones del complejo, por ejemplo a la terminal de contenedores.

Esta terminal de combustibles está dividida en dos zonas, la zona del muelle en la que atracan los barcos y realizan sus labores de carga y descarga y otra conocida como “zona de tanques” en la que se almacenan los combustibles. En esta última zona se realizó un proyecto de sistema contra incendios para el que se definieron los escenarios críticos y se empleó el programa MGpoolfire.

La instalación presenta un área de tanques de almacenamiento de combustibles con 3 tanques de  $1000 \text{ m}^3$  y una zona para el futuro emplazamiento de otro tanque con estas características, ver figura 3, tanques TK-2.01, TK-2.02, TK-2.03, TK-2.04. Además se incorporan dos tanques de  $5000 \text{ m}^3$ , estos son los TK-2.05 y TK-2.06. Todos estos depósitos almacenan fuel-oil y son de techo fijo.

Datos del combustible:

Combustible: fuel-oil,  $\rho_{comb}=995,9 \text{ kg/m}^3$ ,  $\Delta H_c=39800 \text{ kJ/kg}$ ,  $m'=0,035 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

Datos atmosféricos:

$Hr=80\%$ ,  $Ta=28^\circ \text{ C}$ ,  $P_{wo}=3994,29 \text{ Pa}$ ,

Otros:

$F_s=0,4$

donde:

$\rho_{comb}$ : Densidad de la sustancia combustible, se expresa en  $\text{kg/m}^3$ .

$m'$ : Caudal másico evaporado por unidad de superficie,  $\text{kg/m}^2\text{s}$ . En inglés “burning rate”.

$\Delta H_c$ : Entalpía de combustión,  $\text{kJ/kg}$ . Es la cantidad de energía total en forma de calor que será capaz de emitir durante el proceso de combustión cada  $\text{kg}$  de la sustancia que se esté

modelando.

$F_s$ : Fracción de la energía radiada. Es adimensional y difícil de obtener, varía entre 0,1 y 0,4.

$P_{wo}$ : Presión de vapor saturado de agua en aire en Pa.

$Hr$ : Humedad relativa expresada en %.

$Ta$ : Temperatura ambiente en Kelvin.

A continuación se muestra la tabla 1 con las características geométricas fundamentales de los tanques.

**Tabla 1. Características de los depósitos de combustibles de la terminal de combustibles marinos de Mariel**

Depósito	Volumen Vol (m <sup>3</sup> )	Diámetro D (m)	Altura H(m)
TK-2.01	1000	10,43	11,92
TK-2.02	1000	10,43	11,92
TK-2.03	1000	10,43	11,92
TK-2.04	1000	10,43	11,92
TK-2.05	5000	22,79	11,92
TK-2.06	5000	22,79	11,92

Con estos datos se aplica MGpoolfire concibiendo como tanque incendiado al TK-2.05 ya que este define el escenario de incendio más desfavorable en relación con el consumo de agua.

Primeramente se realiza una simulación empleando el Modelo de fuente puntual MFP, ya que como se concluyó en la primera parte del artículo los autores recomiendan el uso de este modelo de simulación de la radiación como herramienta básica o principal, con la cual se debe definir el criterio de vecindad entre el tanque incendiado y los demás tanques contiguos. Para este análisis se toma como límite de radiación asimilable por los tanques el valor de  $I= 10 \text{ kW/m}^2$ , valores de radiación menores o iguales a este presuponen que el tanque expuesto a la radiación no sufre daños y por lo tanto no es necesario enfriar con agua sus paredes y techo expuestos.

Posteriormente se aplica el criterio práctico de vecindad llamado en la primera parte del artículo “criterio 2D” el que se emplea como apoyo para los análisis referidos a la vecindad.

En la figura 3 aparecen los resultados gráficos de la aplicación del MFP, como se puede apreciar los depósitos TK-2.02 y TK-2.06 son alcanzados por un valor de radiación térmica mayor que  $I= 15 \text{ kW/m}^2$ , (apoyarse en la figura 3 para ver el número de los tanques), por lo que se encuentran en la zona de alto peligro y deben ser considerados vecinos del depósito TK-2.05.

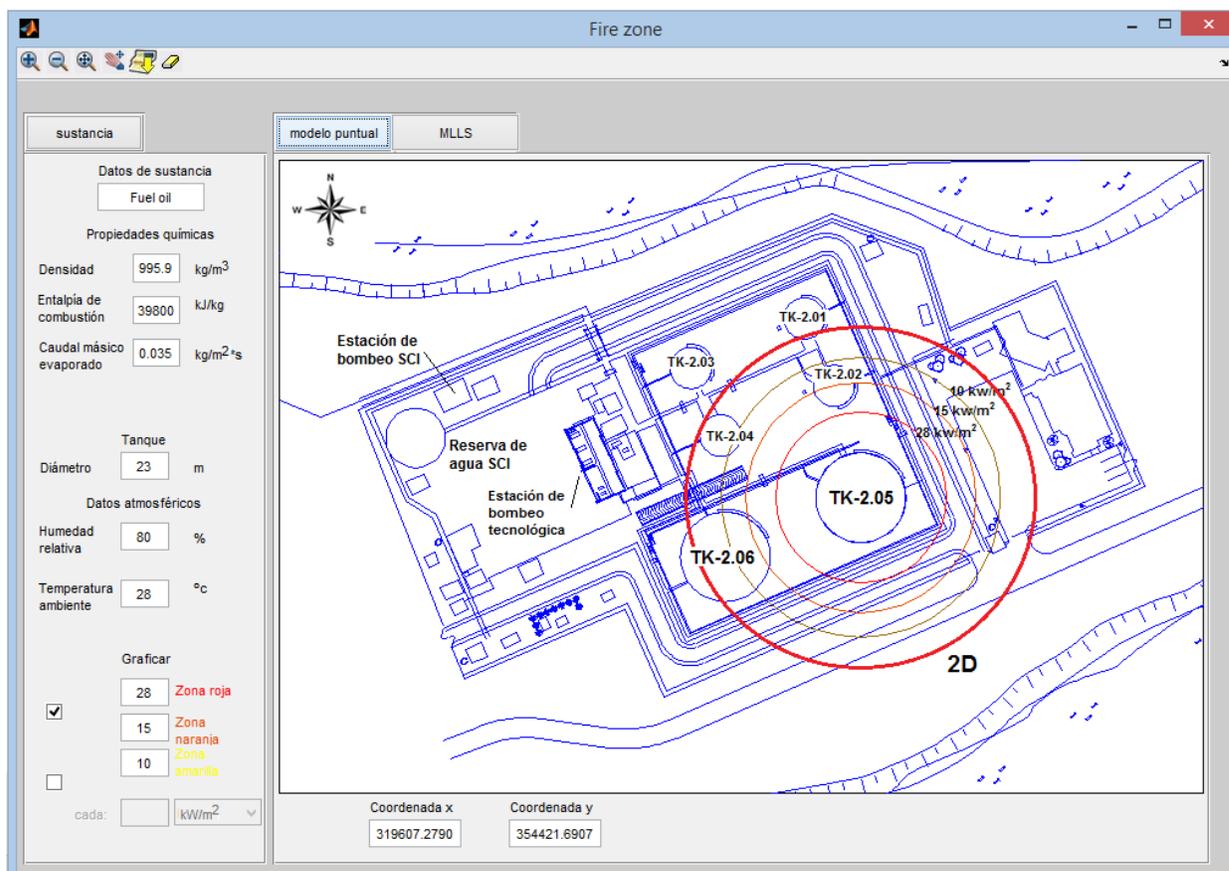
En el caso del tanque TK-2.04 también deberá ser considerado vecino ya que la pared más cercana al depósito incendiado recibe una radiación térmica de  $I= 10 \text{ kW/m}^2$ . Es importante decir que este nivel de radiación  $I= 10 \text{ kW/m}^2$  se ubica a una distancia de una vez el diámetro del tanque incendiado, medido desde su pared, “criterio 1D”, ver primera parte del artículo. Los otros dos tanques TK-2.01 y TK-2.03 se encuentran fuera del alcance de niveles de radiación peligrosos por lo que no se consideran vecinos.

Por otra parte si se considera el criterio 2D se debe incluir al tanque TK-2.01 como tanque vecino con lo cual aumentaría el consumo de agua en 20 L/s que es el caudal necesario para enfriar las paredes de este tanque de 1000 m<sup>3</sup> de capacidad.

Véase cómo en un caso como este la simple aplicación del criterio 2D no sería lo más conveniente, primero por la lejanía del tanque TK-2.01 en relación con el incendiado y segundo porque el tanque TK-2.01 tiene una cierta protección de la radiación que proviene del tanque

TK-2.05 debido a que se encuentra detrás del TK-2.02 que sí es vecino (siguiendo el MFP) y al que por lo tanto se le está enfriando toda su pared.

Es por eso que se ratifica la idea de definir como criterio básico o principal el que brinda el MFP y el criterio de 2D tenerlo en cuenta como secundario. Además es muy importante realizar el análisis de ambos resultados para la toma final de decisiones.



**Figura 3. Resultados de la aplicación del programa MGpoolfire con modelo de fuente puntual MFP y criterio 2D. Incendio en el tanque TK-2.05.**

### **Determinación del criterio de vecindad entre algunos depósitos de la Empresa Comercializadora de Crudos de Matanzas ECCM**

La actual Empresa comercializadora de crudo de Matanzas ECC Matanzas, antigua Terminal de Supertanqueros de Matanzas se encuentra ubicada en la bahía de esta ciudad y es una de las mayores instalaciones destinadas al almacenamiento y trasiego de combustibles de Cuba. Esta bahía es de los pocos lugares de la isla donde se encuentra una instalación de este tipo debido a sus características geográficas y por la profundidad de sus aguas. En la ECC Matanzas se destacan un gran número de tanques o depósitos para el almacenamiento de combustibles, varios de los cuales son de grandes dimensiones con un volumen máximo de 50 000 m<sup>3</sup>.

En este caso se aplica el programa MGpoolfire para definir la vecindad entre tanques de una parte de la red del sistema contra incendios SCI de toda la ECC Matanzas. Esta zona se denomina Base de crudo y suministro y en una de sus áreas se encuentran los tanques TK-33, TK-34, TK-35, TK-36 y TK-37, ver figura 4.

En la tabla 2 se muestran las características geométricas fundamentales de estos tanques, los que almacenan crudo y a continuación se brindan los datos necesarios para las simulaciones.

Datos del combustible:

Combustible: Petróleo crudo,  $\Delta H_c=42600$  kJ/kg,  $m'=0,045$  kg/m<sup>2</sup>s.

Datos atmosféricos:

$H_r=80\%$ ,  $T_a=28^\circ$  C,  $P_{wo}=3994,29$  Pa.

Otros:

$F_s=0,4$

**Tabla 2. Características de los depósitos de combustibles de la base de crudo y suministro perteneciente a la ECC Matanzas.**

Depósito	Volumen Vol (m <sup>3</sup> )	Diámetro D (m)	Altura H (m)
TK-33 TK-34 TK-35 TK-36	10000	34,20	11,91
TK-37	50000	58,27	18,75
TK-29	50000	74,10	11,92
TK-27	1000	10,44	12,58
TK-28	10 000	34,22	12,46

En esta primera simulación se analiza el incendio del tanque TK-37 que sin dudas se considera uno de los mayores incendios que pudieran existir en este emplazamiento debido a las dimensiones del tanque.

Al igual que en el caso anterior se aplica el MFP. Los resultados gráficos asociados con este modelo son los tres anillos de isolíneas de radiación más cercanos a la pared del tanque TK-37, ver figura 4.

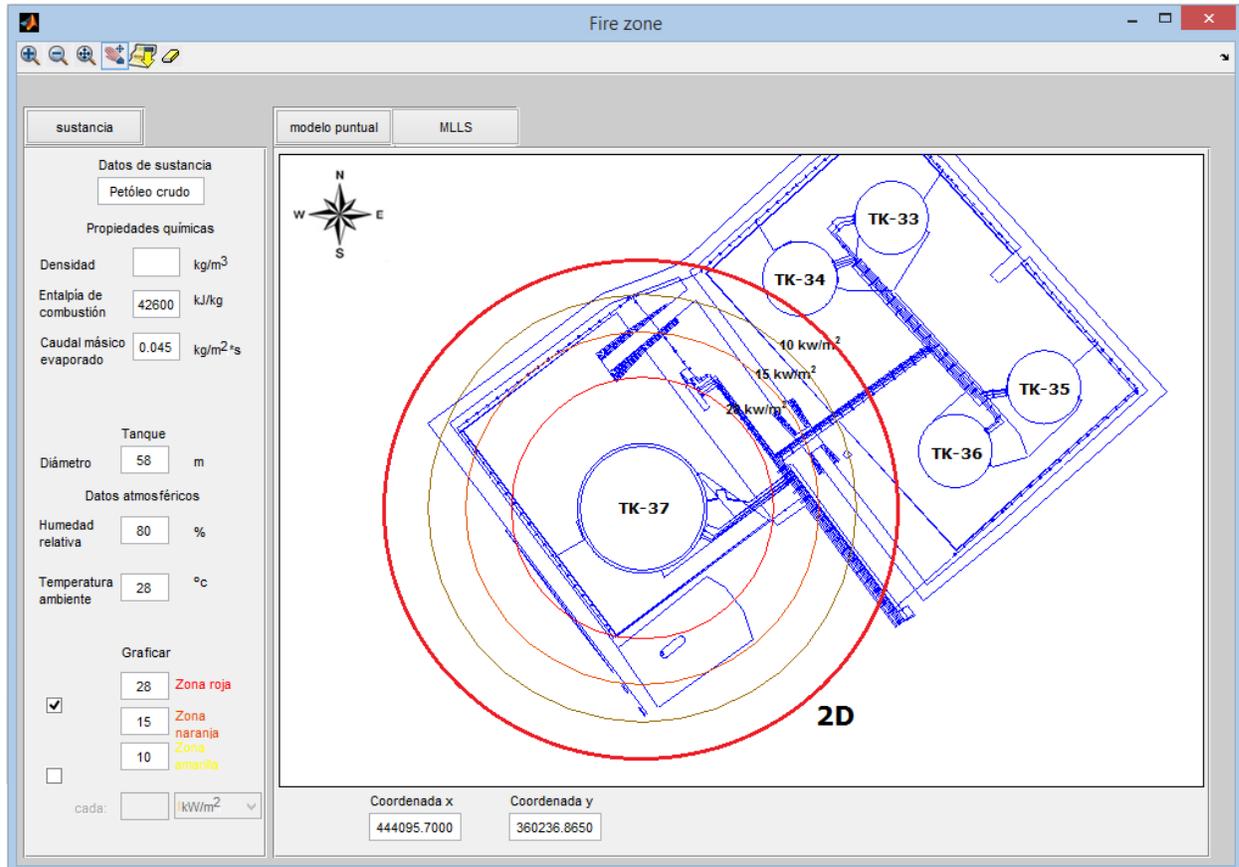
Véase que para estas condiciones ninguno de los tanques está expuesto a una radiación igual o mayor que  $I=10$  kW/m<sup>2</sup>, de hecho al tanque que más radiación le llega aplicando el mismo modelo es al TK-34 y este valor asciende a unos 7,5 kW/m<sup>2</sup>, resultado que se obtuvo aplicando el mismo programa pero obteniendo los resultados de intensidad por distancias.

La distancia entre la isolínea  $I=10$  kW/m<sup>2</sup> y la pared del tanque TK-34 es de 13 m, distancia que si bien no es tan grande garantiza un nivel de seguridad.

Obsérvese que en la figura 4 también se incluye el criterio de vecindad 2D mediante el cual el tanque TK-34 tiene que ser considerado vecino.

A pesar de todos estos resultados obtenidos, para la realización del proyecto del Sistema contra incendios SCI de la Empresa comercializadora de crudos ECC Matanzas, la Agencia de protección contra incendios APCI orientó emplear el criterio 2D para definir la vecindad entre tanques e incluso incluir al tanque TK-36 como vecino por encontrarse cerca del límite de 2D, ver Cabrera (2012).

Esta última decisión implicó tener que concebir el enfriamiento (con agua) de las paredes de los tanques TK-34 y TK-36 orientadas hacia el tanque TK-37, esto significa garantizar un caudal de 100 L/s que no es despreciable y que hasta cierto punto pudiera (en algunos casos) influir de forma importante en el diseño del Sistema contra incendios, no solo en diámetros de tuberías sino en equipos de bombeo y volúmenes de agua a almacenar (reserva de agua del SCI).



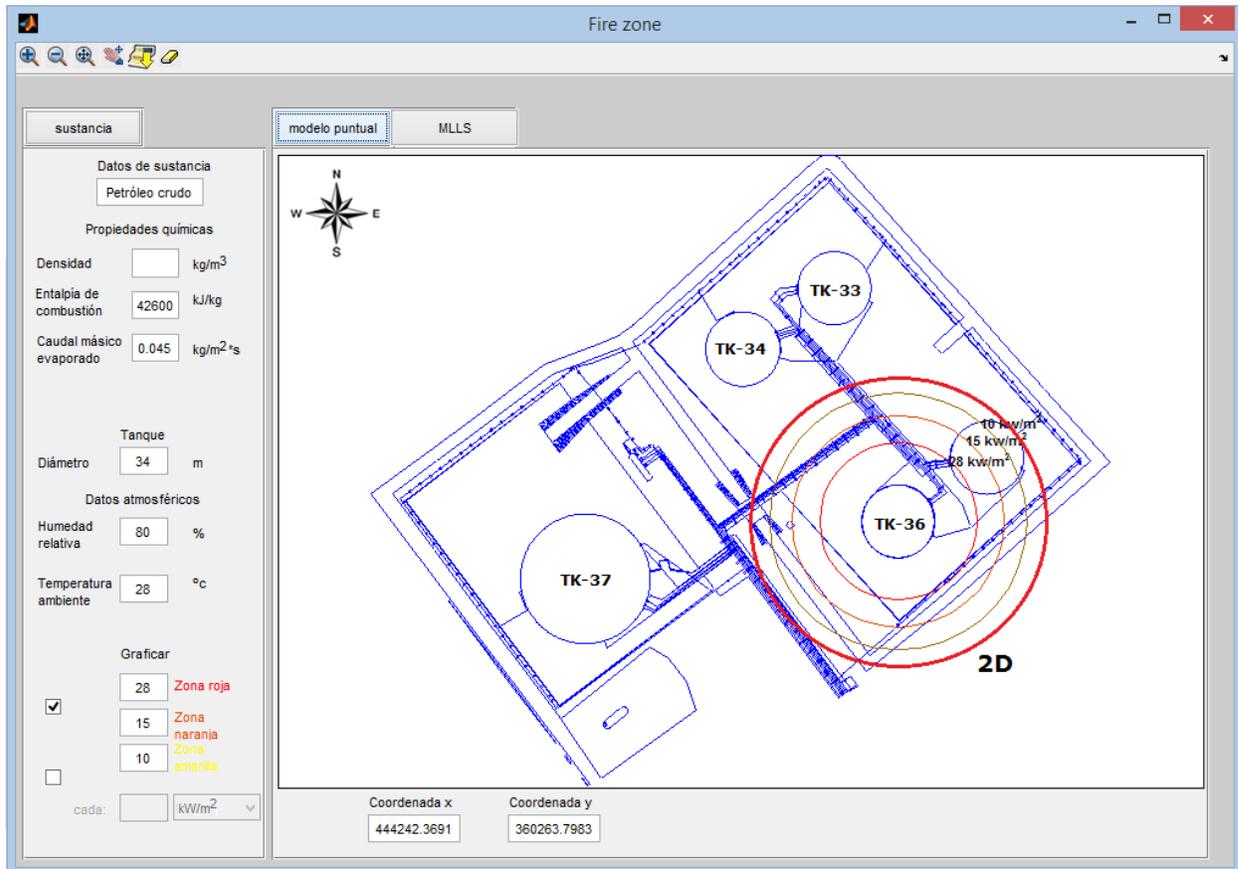
**Figura 4. Resultados de la aplicación de MGpoolfire con el MFP y criterio 2D. Incendio en el tanque TK-37 de la Base de crudo y suministro de la ECCM.**

A continuación se muestran los resultados gráficos de una segunda modelación realizada en esta área en la cual el tanque incendiado es el TK-36, figura 5.

Las parejas de tanques TK-33 – TK-34 y TK-35 – TK-36 se encuentran a distancias menores de un diámetro, es evidente por lo tanto que ante un incendio en el tanque TK-36 se tiene que enfriar la pared expuesta del tanque TK-35, eso queda demostrado en la figura 5 ya que a la pared del tanque TK-35 le llega un alto valor de radiación (más de  $28 \text{ kW/m}^2$ ). Bajo estas condiciones no es necesario enfriar las paredes de ningún otro tanque.

Véase que en ambos escenarios de incendio las isolíneas que definen la  $I = 10 \text{ kW/m}^2$  están bastante cerca del criterio 2D producto de la sustancia en combustión.

En otra área de la Base de crudo y suministro se encuentran los tanques TK-27, TK-28, TK-29 y una estación de bombeo tecnológica, figura 6. En esta misma figura se muestran los tanques TK-22, TK-23, TK-24, TK-25, TK-13, TK-26, TK-16 y la piscina de residuales, los que ya no pertenecen a la Base de crudo y suministro pero están dentro de otra zona de la instalación conocida como “Terminal 320”.

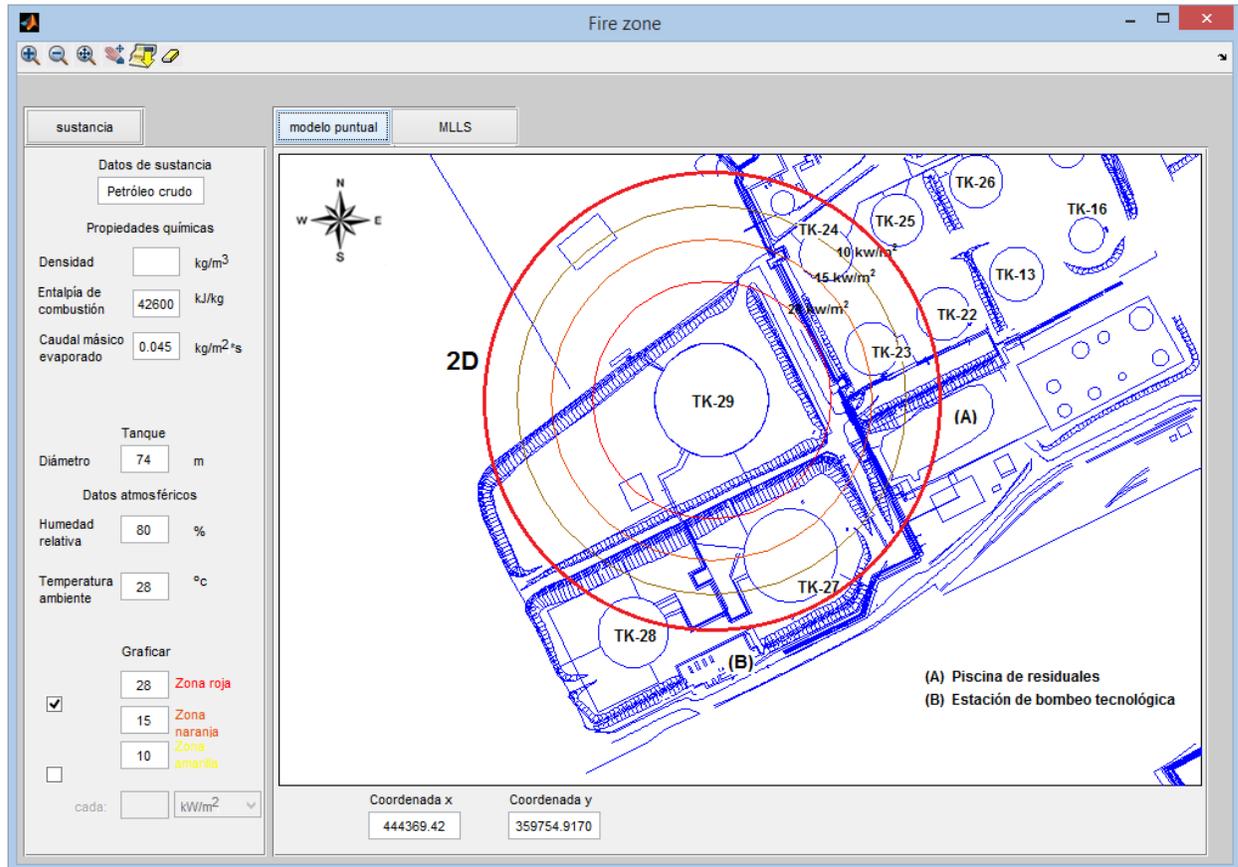


**Figura 5. Resultados de la aplicación de MGpoolfire con el MFP y criterio 2D. Incendio en el tanque 36 del área de crudos de la ECC Matanzas**

En la figura 6 se muestra el resultado de concebir un incendio en el tanque TK-29 teniendo en cuenta el MFP y el criterio 2D como se ha venido haciendo. Este es el escenario de incendio más importante de esta parte de la instalación y que por lo tanto demandará una mayor cantidad de agua, los detalles de estos consumos y análisis hidráulicos se pueden consultar en la tercera parte de este trabajo.

Basados en estos resultados se decidió que los tanques TK-27 y TK-28 serían vecinos del TK-29, en el caso del TK-28 a pesar de que la isolínea de intensidad  $10 \text{ kW/m}^2$  no lo toca, los especialistas de la APCI pidieron tenerlo en cuenta debido a su cercanía a los tanques TK-27 y TK-29. El enfriamiento de este tanque TK-28 solo se realizará en la parte expuesta a los tanques TK-27 y TK-29, en aras de disminuir la demanda de agua.

A pesar de la cercanía evidente de los tanques TK-23 y TK-24 al tanque incendiado (que acorde con los resultados mostrados en la figura 6 se encuentran en una zona de alta radiación producida por el incendio del tanque TK-29), estos no son considerados como vecinos debido a que entre estas instalaciones (Base de crudo y suministro - Terminal 320) existe una barrera física basada en un desnivel topográfico que permite que la radiación proveniente del tanque TK-29 no afecte significativamente a los tanques TK-23 y TK-24. Este es un resultado muy interesante que demuestra que los modelos sirven de apoyo para la toma de decisiones pero siempre es necesario un análisis ulterior.



**Figura 6. Resultados de la aplicación de MGpoolfire con el MFP y criterios 2D. Incendio en el tanque TK-29 de la Base de crudo y suministro de la ECC Matanzas.**

### **Determinación del criterio de vecindad. Incendio en el tanque TK-13 de la Refinería de petróleo “Hermanos Díaz” de Santiago de Cuba.**

La refinería de petróleo “Hermanos Díaz” se encuentra ubicada en Punta de Sal, en la bahía de Santiago de Cuba perteneciente a la provincia del mismo nombre. Dicha refinería ocupa una superficie de unas 181 ha en donde se ubican diferentes áreas en relación con las actividades que allí se realizan.

Desde el punto de vista del análisis de incendio, en esta refinería se puede decir que el área que pudiera generar un mayor incendio (en cuanto al consumo de agua) es la definida como área de tanques en donde existe un elevado número de depósitos de diferentes diámetros para el almacenamiento de combustibles. Se destacan tanques como el TK-11 de unos 50 000 m<sup>3</sup> de volumen y un diámetro de 59,90 m y con datos muy parecidos a este los tanques TK-8 y TK-9. También destacan los tanques TK-12 y TK-13 con unos 32 000 m<sup>3</sup> de volumen y diámetros de 48,76 m, Cabrera (2013), ver algunos de estos tanques en la figura 7.

En esta zona se aplica el modelo GMpoolfire en dos escenarios de incendios que de alguna forma definen el sistema contra incendios, el primero es considerando incendiado el tanque TK-13 y el segundo el tanque TK-11.

Los datos para la realización de la simulación del incendio en el tanque TK-13 mediante el programa GMpoolfire y concibiendo el MFP son los siguientes.

Datos del combustible:

Combustible: Petróleo crudo,  $\Delta H_c=42600$  kJ/kg,  $m'=0,045$  kg/m<sup>2</sup>s.

Datos del tanque:

$D= 48.76$  m (diámetro),  $H=17.50$  m (altura),  $Vol=32000$  m<sup>3</sup> (volumen).

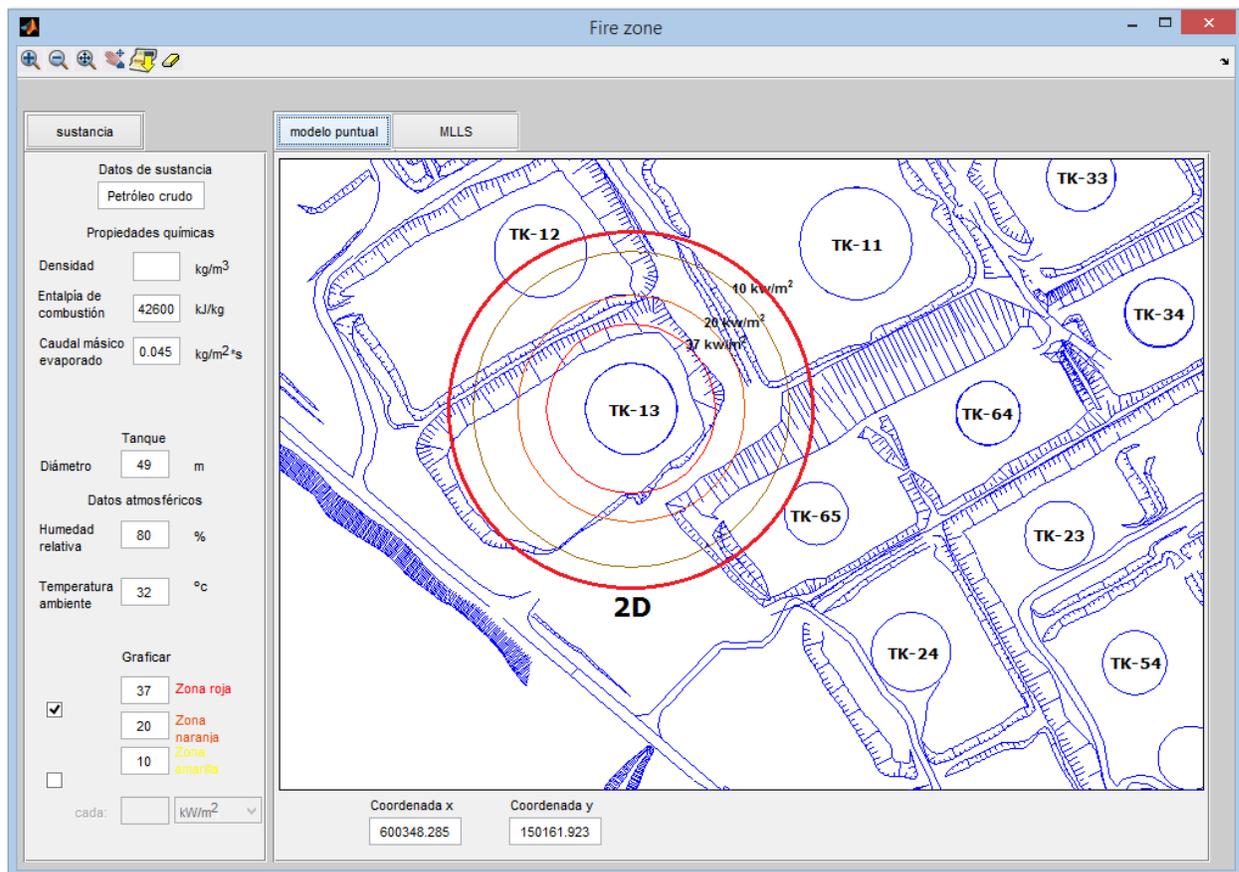
Datos atmosféricos:

$Hr=80\%$ ,  $Ta=32^\circ$  C,  $P_{wo}= 4012,98$  Pa.

Otros:

$F_s= 0,4$

En la figura 7 se muestran los tres anillos concéntricos más cercanos al tanque incendiado que vienen a ser los resultados del MFP y como es costumbre la ubicación del anillo que define el criterio 2D.



**Figura 7. Resultados de la aplicación de MGpoolfire con el MFP y criterio 2D. Incendio en el tanque TK-13 de la refinería de petróleo “Hermanos Díaz” de Santiago de Cuba.**

Véase que el valor de radiación límite  $I= 10$  kW/m<sup>2</sup> llega al tanque TK-12 por lo tanto se deberá tener en cuenta como vecino del incendiado. Además, como el combustible es petróleo, la isolínea definida por  $I= 10$  kW/m<sup>2</sup> se encuentra muy cerca de la distancia que define al criterio 2D y que prácticamente toca a la pared del tanque TK-65. Concebir a este otro tanque como vecino deberá ser analizado ya que la isolínea  $I = 10$  kW/m<sup>2</sup> se encuentra a unos 12 metros de la pared. Además el techo del tanque TK-65 está unos 6 metros por debajo de su similar del tanque incendiado, aspecto este muy importante en el análisis. También importante es decir que la

incorporación de este tanque como vecino incrementaría de una forma considerable el consumo de agua del sistema. Por todo lo antes expuesto el criterio de los autores es que no debe ser considerado como vecino.

A continuación se muestran los datos para la realización de la simulación del incendio en el tanque TK-11 mediante el programa GMpoolfire y concibiendo el MFP.

Datos del combustible:

Combustible: Petróleo crudo,  $\Delta H_c=42600$  kJ/kg,  $m'=0,045$  kg/m<sup>2</sup>s.

Datos del tanque:

$D=59,90$  m (diámetro),  $H=17,00$  m (altura),  $Vol=50000$  m<sup>3</sup> (volumen).

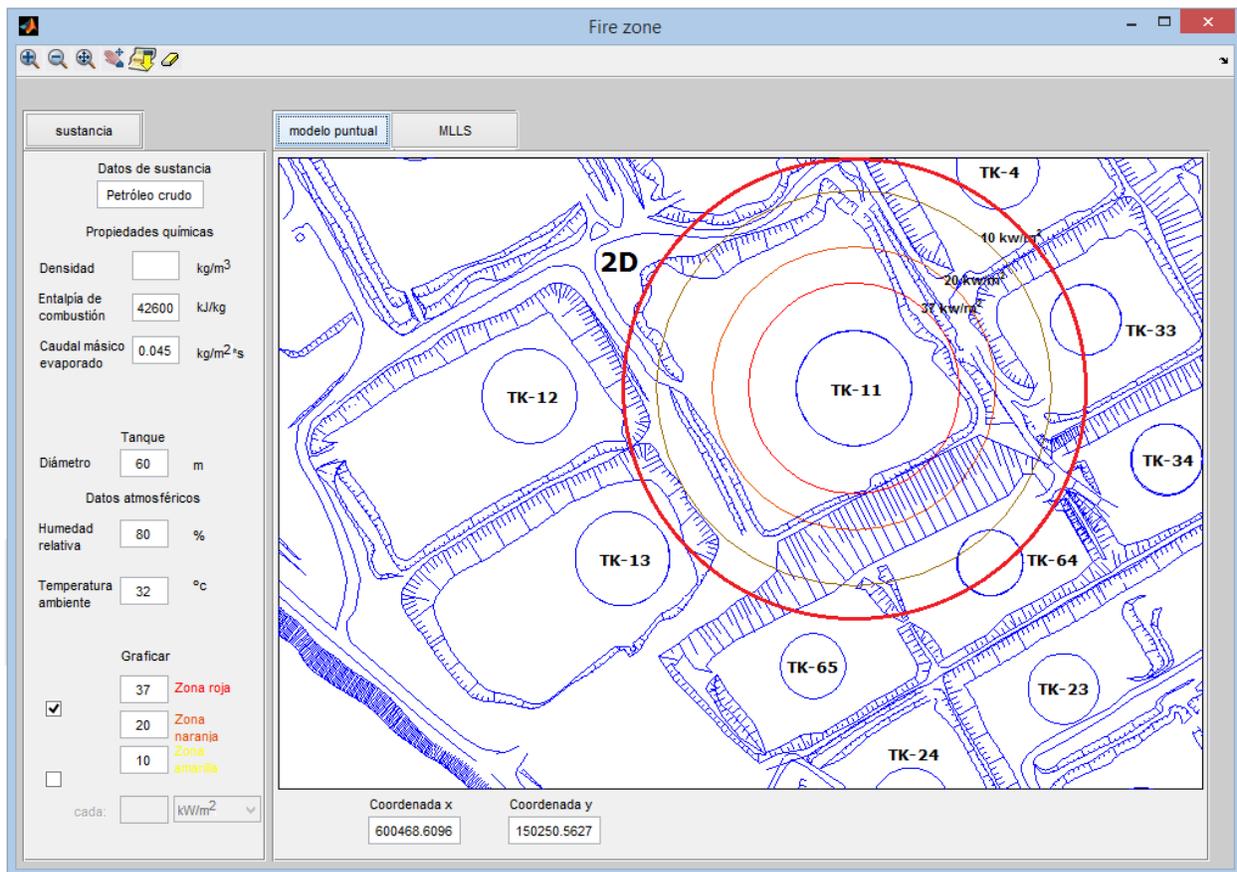
Datos atmosféricos:

$Hr=80\%$ ,  $Ta=32^\circ$  C,  $P_{wo}=4012,98$  Pa.

Otro:

$F_s=0,4$

En la figura 8 se muestran los resultados del MFP materializados en los tres anillos concéntricos más cercanos al tanque incendiado y el anillo que define el criterio 2D.



**Figura 8. Resultados de la aplicación de MGpoolfire con el MFP y criterio 2D. Incendio en el tanque TK-11 de la refinería de petróleo “Hermanos Díaz” de Santiago de Cuba.**

Véase que el valor de radiación límite  $I=10$  kW/m<sup>2</sup> llega al tanque TK-64 por lo tanto se deberá tener en cuenta este como vecino del incendiado. También este valor de radiación queda

muy cercano al tanque TK-33, unos 3 metros, en cuyo caso deberá tomarse una decisión sobre si se considera como vecino debido al gran caudal que implicaría este escenario de incendio con esa inclusión.

Aceptar el criterio 2D en este caso sería exagerado ya que habría que considerar el enfriamiento de los tanques TK-4, TK-33 y TK-64 y obsérvese que el TK-13 está bien cerca del anillo que define este criterio.

Como en el caso anterior la isolínea definida por  $I=10 \text{ kW/m}^2$  se encuentra muy cerca de la distancia que define al criterio 2D producto del combustible, como ya ha venido ocurriendo.

## CONCLUSIONES

- Se crea una herramienta computacional llamada GMpoolfire para la determinación de la intensidad de la radiación térmica generada por un incendio de tipo charco (pool fire) como los que ocurren en los tanques para almacenamiento de combustible. GMpoolfire tiene incorporado los modelos de fuente puntual MFP y el modelo de llama sólida MLLS con las variantes de calma (es decir, sin viento) y con viento.
- Se aplica el programa GMpoolfire a varios casos de estudio de importantes emplazamientos petroleros en Cuba, lo que sirve de base para la definición de la vecindad entre tanques y posibles escenarios de incendios. Los resultados aquí obtenidos son empleados en la tercera parte del trabajo para la ejecución del llamado modelo detallado de red.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda incorporar esta herramienta al grupo de programas establecidos en la Empresa de Ingeniería y Proyectos del Petróleo de Cuba (EIPP) para el diseño y revisión de Sistemas contra incendios en la industria del petróleo.
- Los modelos incorporados a GMpoolfire gozan de total vigencia y son muy tenidos en cuenta en el mundo para realizar este tipo de análisis de radiación. GMpoolfire está diseñado de una forma fácil y amigable para los usuarios y está enfocado a las necesidades de los especialistas que realizan proyectos de ingeniería de Sistemas contra incendios.

## 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. Bustamante 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), La Habana, Cuba.
- Bustamante G. F.** (2012). “Cálculos de Flujo de Calor de Radiación (Versión 1.03)”. Guía de referencia técnica. Agencia de Protección Contra Incendios APCI, Habana, Cuba.
- Cabrera E.** (2012) “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 de Ingeniería 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.
- González F. E., Ruiz F. J., Miñana A. A., Navarro G. J., Ruiz G. J y Martínez A. J.** (2002). “Zonas de planificación para accidentes graves de tipo térmico (en el ámbito del Real Decreto 1254/99 (Seveso II)”. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Murcia. Dirección general de protección civil, Ministerio del Interior. España.
- Matlab** (2014). “Mapping Toolbox, User’s Guide R2014b”. The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, USA. Extraído de: [http://www.mathworks.com/help/pdf\\_doc/map/mapug.pdf](http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/map/mapug.pdf) en diciembre 2014.
- McGrattan, B. K. Baum, R. H. Hamins, A.** (2000). “Thermal Radiation from Large Pool Fires”. National Institute of Standards and Technology. U.S. Department of Commerce. USA.
- TNO** (2014). “TNO safety software effects, version 9. User and reference manual”. TNO Built Environment & Geosciences, Department Urban Environment and Safety. Utrecht, Netherlands.