

► Prediction of heat flux radiation from jet fires through image processing

Predicción de la radiación
térmica emitida por

DARDOS DE FUEGO

a través del
procesamiento
de imágenes

Por:  Diana Laura Lima Bravo • Eduardo Javier López Jiménez • Adriana Palacios Rosas



Lima Bravo, D. L., López Jiménez, E. J. y Palacios Rosas, A. (2023). Predicción de la radiación térmica emitida por dardos de fuego a través del procesamiento de imágenes. *Entorno UDLAP*, 21.

 **Recibido:** 17 de mayo de 2023  **Aceptado:** 28 de septiembre de 2023

► Prediction of heat flux radiation from jet fires through image processing

Predicción de la radiación
térmica emitida por

DARDOS DE FUEGO

a través del
procesamiento
de imágenes

Por:  Diana Laura Lima Bravo • Eduardo Javier López Jiménez • Adriana Palacios Rosas



Lima Bravo, D. L., López Jiménez, E. J. y Palacios Rosas, A. (2023). Predicción de la radiación térmica emitida por dardos de fuego a través del procesamiento de imágenes. *Entorno UDLAP*, 21.

 **Recibido:** 17 de mayo de 2023  **Aceptado:** 28 de septiembre de 2023

RESUMEN

A lo largo de los últimos cinco años se han generado aproximadamente 5,000 explosiones en las industrias de procesos químicos en México, desde petroquímicas hasta alimenticias, provocando grandes daños a las personas, las instalaciones y el medioambiente. La presente investigación presenta un análisis experimental, matemático y computacional para encontrar una manera automática de medir el alcance de las llamas de difusión turbulentas denominadas incendios de chorro, dardos de fuego o *jet fires* en inglés; basado en un análisis de tratamiento y medición de imágenes conformadas por píxeles y apoyado por la programación en la aplicación MATLAB®. La radiación térmica de estos dardos de fuego a escala laboratorio ha sido calculada como una función del diámetro del orificio de salida del combustible y la longitud de la llama, obtenida con el presente tratamiento de imágenes experimentales. Esto fortalece el estudio del comportamiento de los dardos de fuego (*jet fires*) para prevenir fenómenos de riesgo, evitando así la propagación de un daño mayor a través de una secuencia de accidentes graves generados por un dardo de fuego.

PALABRAS CLAVE

Radiación térmica • Flujo turbulento
• Tratamiento de imágenes • Dardo de fuego
• Incendios industriales

ABSTRACT

Throughout the last five years, approximately 5,000 explosions have been generated in the chemical process industries in Mexico, from petrochemical to food, causing great damage to people, facilities, and the environment. This work presents an experimental, mathematical, and computational analysis to find an automatic way to measure the reach of turbulent jet diffusion flames, based on a treatment analysis and pixelated image measurements, and supported by programming in the MATLAB® application. The thermal radiation of these laboratory-scale jet fires has been calculated as a function of the diameter of the fuel exit hole and the length of the flame, obtained with the present treatment of experimental images. This will strengthen the study of the behavior of jet fires to prevent risk phenomena and avoid the spread of greater damage through a sequence of serious accidents generated by a jet fire.

NOMENCLATURA

C_p

CALOR ESPECÍFICO DEL AIRE A
TEMPERATURA AMBIENTE (KJ/KG·K)

D

DIÁMETRO DE LA TUBERÍA (M)

G

ACELERACIÓN DE LA GRAVEDAD
(m^2/s)

H

ALTURA DE LA LLAMA, DESDE
EL DIÁMETRO DE SALIDA DEL
COMBUSTIBLE HASTA LA PUNTA
DE LA LLAMA (m)

i

REGIÓN VERDADERA EN PÍXELES

\dot{Q}

TASA DE CALOR IRRADIADO (KW)

Q^*

PARÁMETRO ADIMENSIONAL,

$$(Q^* = Q / \rho_a C_p T_a \sqrt{gDD^2})$$

rv

VARIABLE ALEATORIA
INDEPENDIENTE

T_a

TEMPERATURA ATMOSFÉRICA (K)

X

VALOR NUMÉRICO

GRIEGO

P_a

DENSIDAD DEL AIRE A PRESIÓN
ATMOSFÉRICA (kg/m^3)

ACRÓNIMOS

PPI

PIXELES POR PULGADA
(DPI EN INGLÉS)

RGB

COMPONENTES DE COLORES
PRIMARIOS, COLOR ROJO, VERDE Y
AZUL

KEYWORDS

Heat flux radiation • Turbulent flow • Image processing • Jet fire • Industrial fires

INTRODUCCIÓN

En las industrias químicas y petroquímicas, la gestión, procesamiento y transporte de sustancias y materiales puede implicar en muchas ocasiones el riesgo de explosiones incendios que comprometen la seguridad de los trabajadores, así como los activos y equipos de las empresas. Los incendios, explosiones, vertidos y emisiones tóxicas son los accidentes más importantes de la industria química y afines (Rivera, 2020; Palacios *et al.*, 2021). Específicamente, los incendios presentan graves consecuencias, tales como grandes flujos de calor y modificación de la calidad del aire, al generar gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global. Con base en los estudios realizados por el Centro Nacional de Comunicaciones (2023) «los incendios son fuegos de grandes proporciones que se desarrollan sin control, los cuales pueden presentarse de una manera instantánea o gradual, pudiendo provocar daños materiales, interrupción de los procesos de producción, pérdida de vidas humanas y afectación al ambiente» (párr. 1). La razón del interés que



LOS INCENDIOS PRESENTAN GRAVES CONSECUENCIAS, TALES COMO GRANDES FLUJOS DE CALOR Y MODIFICACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE, AL GENERAR GASES DE EFECTO INVERNADERO QUE CONTRIBUYEN AL CALENTAMIENTO GLOBAL.

despiertan los incendios radica en la gravedad de sus consecuencias ya que, junto con las explosiones, son los accidentes más catastróficos en una instalación industrial, con la posibilidad de la destrucción de la totalidad de las infraestructuras existentes. Conocer el comportamiento de los incendios es de suma importancia para poder decidir la colocación de las medidas de seguridad y salvaguardas para prevenir y/o mitigar estos accidentes. De acuerdo con Palacios et al. (2009):

Los incendios son los accidentes graves más frecuentes ocurridos en las industrias químicas y petroquímicas, seguidos de explosiones y formación de nubes tóxicas y/o inflamables de gas. Además, se encontró que, de los accidentes ocurridos en los puertos marítimos, el 51 % corresponden al caso general de pérdida de contención, 29 % corresponden a incendios, 17 % a explosiones y 3 % a nubes de gases tóxicos y/o inflamables. Cuando sólo los accidentes con resultado de incendio, explosión o nubes de gases tóxicos y/o inflamables son considerados, los valores resultantes fueron 59.5 % para incendios, 34.5 % para explosiones y 6 % para nubes de gases tóxicos y/o inflamables. Entre los accidentes ocurridos durante el transporte de sustancias

peligrosas por carretera y/o ferrocarril, se encontró que el 65 % fueron incendios, el 24 % fueron explosiones y el 11 % nubes de gases tóxicos y/o inflamables.

Con base en lo anterior, los incendios pueden ser considerados peligrosos en ambientes industriales y han costado millones de dólares en daños, sin hablar de las pérdidas y lesiones ocasionadas a las personas y el medioambiente. Un tratamiento correctamente realizado sobre el comportamiento de estos fenómenos, por ejemplo, mediante un análisis de imágenes extraídas de videos que posteriormente serán fragmentadas para generar una estadística de estos sucesos, se plantea en el presente estudio como una metodología que permita identificar y entender su comportamiento, evitando así posteriores incidencias y propagaciones de incendios.

• **Accidentes graves con fuego**

Los accidentes graves con fuego se pueden clasificar en las categorías generales que se muestran en la tabla 1. Dentro de este tipo de accidentes, el dardo de fuego es de especial interés, pues a pesar de tener dimensiones menores comparadas con otro tipo de incendios como

Tabla 1. Clasificación de accidentes graves con fuego (Palacios, 2011).

Accidente	Descripción
Incendios de charco (<i>pool fires</i>)	Combustión en estado estacionario de un charco de líquido inflamable con un tamaño y forma determinados, delimitados por la presencia de un dique o por la pendiente del terreno.
Incendios de tanque (<i>tank fires</i>)	Similar a los incendios de charco, pero generalmente con una forma circular, donde el diámetro es determinado por el tamaño del tanque. Este tipo de llamas se encuentran a cierta altura sobre el nivel del suelo.
Dardos de fuego (<i>jet fires</i>)	Llamas de difusión turbulenta en estado estacionario con una gran relación longitud-diámetro, causadas por la ignición de un dardo turbulento de gas o vapor inflamable.
Incendios repentinos (<i>flash fires</i>)	Son incendios repentinos e intensos en los que las llamas se propagan a través de una mezcla de aire y gas o vapor inflamable. Éstos están asociados con la dispersión atmosférica de gas-vapor bajo ciertas condiciones meteorológicas. Cuando la nube se encuentra con una fuente de ignición, la llama se propaga a través de la mezcla inflamable.

los de charco o de tanque, los dardos de fuego han sido señalados repetidamente como los iniciadores de secuencias de accidentes a través de un efecto dominó, que escala las consecuencias (Gómez-Mares *et al.*, 2008). De acuerdo con Casal (2017):

El efecto dominó se ha definido como una cascada de eventos en los que las consecuencias de un accidente anterior se ven incrementadas tanto espacial como temporalmente por los siguientes, dando lugar a un accidente grave mayor. Las instalaciones involucradas en un efecto dominó pueden o no pertenecer al mismo establecimiento (párr. 6).

El dardo de fuego es un fenómeno en el ámbito de incendios que puede suceder en tanques a presión o tuberías que transportan/almacenan productos inflamables bajo presiones

de 2 bares o mayores (Palacios *et al.*, 2009). Éstos ocurren cuando hay una fuga, orificio o ruptura en la tubería o tanque presurizado y el producto combustible es impulsado a la atmósfera; una vez alcanzado su punto de ignición, como consecuencia se produce un dardo de fuego en la dirección del combustible que, dependiendo de las condiciones, puede llegar a alturas considerables y alcanzar temperaturas de más de 1,250 °C, como el que se presenta en la figura 1.

• Análisis histórico de dardos de fuego ocurridos en México

Se presenta el análisis de algunos ejemplos de accidentes de dardos de fuego ocurridos en México durante los años 2019-2021 (tabla 2), ya que durante este periodo el aumento de incendios en el mundo se presentó de manera progresiva.

Tabla 2. Accidentes de dardos de fuego ocurridos en México durante los años 2019-2021.

Fecha	Lugar	Descripción
18 de enero de 2019	Tlahuelilpan, Hidalgo	Un accidente provocó la trágica muerte de casi 120 personas. El accidente se debió a la explosión de un oleoducto de Petróleos Mexicanos (Pemex) que había sufrido una fuga de gasolina alrededor de las 5 de la tarde. Muchas personas aprovecharon la oportunidad de obtener combustible gratis y comenzaron a recolectarlo de manera ilegal. Unas dos horas después, se reportó la fuga del oleoducto a las autoridades y se produjo una explosión, cuyo origen fue un dardo de fuego. Los bomberos lograron controlar el fuego alrededor de la medianoche del mismo día. Es importante señalar que la recolección ilegal de combustibles directamente de los ductos de Pemex es una práctica común en estados como Puebla, Hidalgo y Oaxaca, entre otros, en México (Gallangos, 2019).
18 de abril de 2020	Minatitlán, Veracruz	La petrolera Pemex sufrió un incendio en la refinería de Minatitlán, dejando un saldo de siete heridos. Los reportes sobre el incidente apuntaron a que las llamas fueron provocadas por una fuga en la bomba de carga de la planta denominada Reformadora. La tercera mayor refinería de México dejó de operar varias semanas como consecuencia del incendio, generado nuevamente con un dardo de fuego como evento iniciador (García, 2020).
26 de junio de 2021	Campeche	Se produjo un incendio en el mar del estado de Campeche, en el golfo de México, que duró varias horas. El fuego se originó en la madrugada de ese viernes debido a una fuga de gas en un ducto de Pemex, que se encontraba a unos 150 metros de la plataforma satélite KU-C del complejo petrolero Ku-Maloob-Zaap (KMZ) de Pemex. Esa misma tarde, la petrolera estatal informó que las llamas, que se iniciaron por un dardo de fuego, habían sido controladas y que no se habían registrado heridos ni daños en la extracción de crudo (Suárez, 2021).

• Radiación térmica emitida por dardos de fuego

El calor irradiado a los alrededores es una de las principales características de los incendios industriales, ya que a partir de este valor es posible establecer las distancias de seguridad para las personas y los equipos en las instalaciones industriales. Además, estos valores también permiten predecir el nivel de daños que podría ocurrir en plantas químicas y/o petroquímicas, si se suscitara estos accidentes graves con fuego (API, 2014).

El flujo de calor irradiado a los alrededores ha sido estudiado por varios autores como función de diversas variables; por ejemplo, a través de la longitud de la llama, el caudal másico de combustible y/o el diámetro de orificio de salida del combustible. El objetivo del presente artículo es predecir la radiación térmica emitida por dardos de fuego de propano, a escala laboratorio, a través del procesamiento de imágenes experimentales. En el presente estudio se analizará el calor irradiado por la llama como una función de su longitud y el diámetro del orificio de salida del combustible, tal y como se hizo en el estudio realizado por Bradley *et al.* (2016). Fueron analizados dardos de fuego de 0.08 m a 110 m, que involucraban 6 combustibles, obteniéndose expresiones matemáticas para predecir el calor irradiado de la llama. En el presente estudio se utilizarán dos de las ecuaciones ([2] y [3]) obtenidas por Bradley *et al.* (2016) para estimar la radiación térmica emitida por dardos de fuego de propano a escala laboratorio; las principales variables para el cálculo de la radiación térmica son el diámetro del orificio de salida del combustible y la longitud de la llama. Esta última se obtuvo a través del procesamiento de imágenes, tal y como se describe en el apartado «Metodología».

◆◆ METODOLOGÍA

Para obtener la geometría en una estadística de una llama en un video fragmentando para su análisis, se programaron dos códigos en MATLAB®; el primero se encarga de grabar un video y tomar una foto de la llama para posteriormente analizarla, con ayuda del segundo código se analiza cada fragmento del video para obtener las medidas geométricas de la llama (*i. e.* contorno, altura y anchura).

• Códigos MATLAB®

A continuación, se presenta el primer código programado en MATLAB®. Este código ha sido elaborado para la obtención de imágenes a tra-

vés de la fragmentación de los videos experimentales. Estas imágenes son posteriormente guardadas automáticamente en formato AVI en el ordenador (figura 2) para su posterior tratamiento.

En la figura 3 se muestra el segundo algoritmo desarrollado para generar una imagen de la llama, con base en los fragmentos obtenidos del video experimental (figura 2). Este segundo código, programado en MATLAB®, se encarga inicialmente de identificar la ubicación del video; a continuación, recorre cada fragmento del video, para obtener la desviación estándar, con base en un promedio de las imágenes de cada fragmento. Finalmente, obtiene el contorno de la llama mediante una imagen en escala de grises y una imagen promedio donde se puede observar la luz emitida por la llama para definir correctamente las medidas geométricas (*i. e.* contorno, altura y anchura) de cada llama.

La figura 4 muestra una imagen en escala de grises, obtenida a través del uso de los códigos mostrados en las figuras 2 y 3. Como se mencionó anteriormente, este formato ayuda a identificar la luz emitida por la llama para lograr una mayor precisión durante la obtención de sus medidas geométricas.

Las regiones óptimas, con base en las estadísticas, representan objetos teóricos que comparten una propiedad común de homogeneidad. Así, las expectativas de las regiones estadísticas adyacentes son diferentes para al menos un canal de color 2 escala de grises, que se obtienen de la muestra de cada pixel estadístico para valores escala de grises observados en la figura 4. Las figuras 5 y 6 muestran cómo el contorno de la llama es obtenido, a través de la figura 4, en donde la luz emitida por la llama ha sido analizada.

Finalmente, la figura 7 muestra la última parte del segundo código, en donde se observa la obtención de una imagen promedio (figura 8); obtenida del video original del dardo de fuego, tras el uso de los códigos programados y mostrados en las figuras 2, 3, 5 y 7. Es decir, esta imagen ha sido obtenida de los fragmentos promedio del video original, la cual servirá como marco de referencia para la obtención de las medidas geométricas de la llama.

Es importante mencionar que cada canal de color se reemplaza por un conjunto de X variables aleatorias independientes (rv), tomando valores positivos en dominios delimitados por $i = X$. Esto muestra la expectativa de pixeles estadísticos y la imagen generada. Dada la propiedad de homogeneidad, las fronteras entre

Los dardos de fuego han iniciado secuencias de accidentes a través de un efecto dominó que escala las consecuencias, por eso, merecen especial atención.



1

Figura 1. Dardo de fuego (Palacios, 2011).

2

Figura 2. Código elaborado para la obtención de fragmentos de videos en MATLAB®. Elaboración propia.

3

Figura 3. Código elaborado para el procesamiento de imágenes en MATLAB®. Elaboración propia.

4

Figura 4. Imagen obtenida con los códigos de MATLAB® (figuras 2 y 3) para la medición de las características geométricas de la llama (*i. e.* contorno, altura y anchura) en escala de grises.

5

Figura 5. Código de procesamiento de imágenes en MATLAB® para obtener el contorno de la llama (continuación del segundo código mostrado en la figura 3).

6

Figura 6. Imagen obtenida de los códigos de MATLAB® (figuras 2, 3 y 5), muestra la obtención del contorno de la llama.

7

Figura 7. Código de procesamiento de imágenes en MATLAB® para obtener la imagen promedio y sacar las medidas geométricas de la llama (continuación del segundo código mostrado en las figuras 3 y 5).

8

Figura 8. Imagen promedio de los fragmentos del video de la llama.

9

Figura 9. Imagen promedio de los códigos de MATLAB® (figuras 2, 3, 5 y 7) para la obtención de las medidas de las características geométricas de la llama (*i. e.* contorno, altura y anchura) con base en la figura 8.

10

Figura 10. Imagen original de la llama obtenida a partir de los códigos de MATLAB® a través de video e imagen en un ambiente abierto.

11

Figura 11. Imagen obtenida de los códigos de MATLAB® para la medición de superficies en escala de grises con base en la figura 10.

12

Figura 12. Imagen obtenida de los códigos de MATLAB® para la medición de superficies, donde se muestra el margen de cada superficie de la llama con base en la figura 11.

13

Figura 13. Imagen obtenida de los códigos de MATLAB® para la medida de las principales características geométricas de la llama, en un ambiente abierto, con base en las figuras 10-12.

14

Figura 14. Imagen original de la llama obtenida a partir de los códigos de MATLAB® de obtención de video e imagen en un ambiente cerrado.



```

camlist = webcamlist;
% Conexión a la cámara
cam = webcam(1);
preview(cam);
img = snapshot(cam);
imshow(img)
%Nos muestra la imagen en el panel de MATLAB.
%Video
vid=VideoWriter('f1');
%Se comienza a grabar los fragmentos del video
open(vid);
for frames = 1:1000
    %Make single image
    img = snapshot(cam);
    %Display image
    imshow (img)
    T(frames)=getframe;
end
writeVideo(vid,T);
%Se guarda el video que se ha creado
close (vid);
issave
%Se guarda una imagen del video
    
```

```

C:\Users\diani\Documents\MATLAB
%Ubicación de archivos en escritorio
clear; close; axis;
%Limpia el panel de análisis para evitar contraposiciones de otros códigos.
threshold=0.9;
%Cambiar los canal del video por los de la imagen por lo que se pone en zeros
vid=videoReader('Tarea_Imagen_041.avi');
%Nombre del video en la carpeta
%CurrentLine=4.99;
% Background
n=1;
vidFrame=readFrame(v);
% Average frame
B=avg(vidFrame-vidFrame(1));
%zeros(size(vidFrame(1,:),3));
%Inicia el procesamiento del video
while hasFrame(v)
    n=n+1;
    vidFrame=readFrame(v);
    Tmp=vidFrame-vidFrame(1);
    A=(double(max(Tmp,[]))/255);
    B=A.*B;
end
%Inicia el análisis de cada fragmento del video obtenido para obtener un promedio de las imágenes obtenidas.
B=0/A;
% Standard deviation
%CurrentLine=4.99;
n=1;
vidFrame=readFrame(v);
C=zeros(size(vidFrame(1,:),3));
while hasFrame(v)
    n=n+1;
    vidFrame=readFrame(v);
    Tmp=vidFrame-vidFrame(1);
    A=(double(max(Tmp,[]))/255);
    C=C+(A-B).*(n-1);
end
C=sqrt(C/(n-1));
%Showin
%X figure
figure(1);
imshow(0.*(B>threshold));
%Muestra la imagen de RGB
    
```



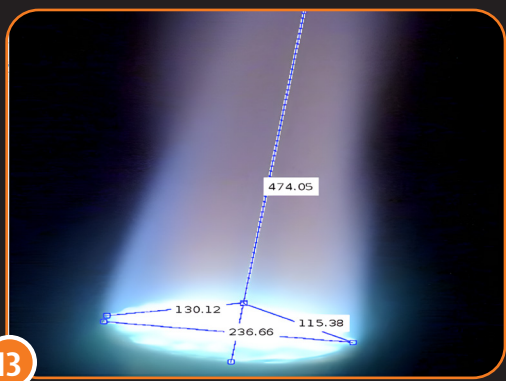
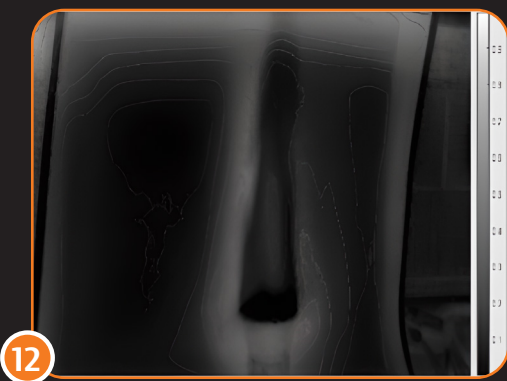
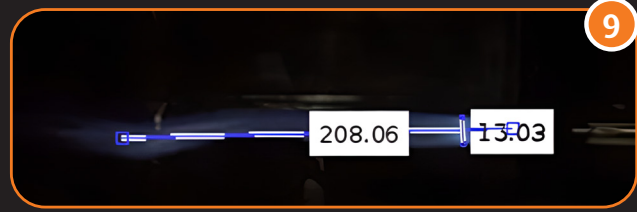
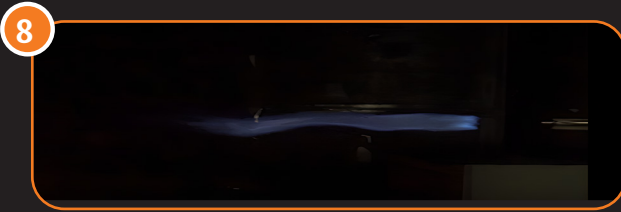
```

colorbar;
hold all;
contour(C);
%Nos muestra el contorno/ perímetro de la llama
    
```



```

figure(2);
imshow(C);
%Nos muestra la imagen original
colorbar;
%Obtenemos los datos necesarios para las medidas.
    
```



15

Figura 15. Imagen obtenida de los códigos de MATLAB® para la medición de superficies, donde se muestra el margen de cada superficie de la llama, con base en la figura 14.

15



16

Figura 16. Imagen obtenida de los códigos de MATLAB® para la medición de superficies en escala de grises con base en la figura 15.

16



17

Figura 17. Imagen obtenida de los códigos de MATLAB® para la medida de la expulsión de la llama, en un ambiente cerrado, con base en las figuras 14-16.

17



**LA HERRAMIENTA
«REGLA» EN
MATLAB®
PERMITE MEDIR
CADA ESPACIO
DELIMITADO
DE CADA
CARACTERÍSTICA
GEOMÉTRICA DE
LA LLAMA.**

regiones verdaderas están conectando píxeles con diferencias en sus expectativas de color, y el segmento ideal trazado desde la base en las fronteras entre las regiones estadísticas. Para obtener la medida del contorno de la llama dentro de cualquier región estadística y con cualquier canal de color 2 escala de grises, los píxeles estadísticos tienen la misma expectativa para este canal de color.

Los códigos desarrollados en MATLAB® (figuras 2, 3, 5 y 7) permiten generar la imagen promedio de la llama (figura 8), a través del tratamiento de todo el video experimental del dardo de fuego; para posteriormente obtener las características geométricas de la llama (*i. e.* contorno, altura y anchura) (figura 9) con base en la desviación estándar de cada fragmento del video. Es decir, la obtención de estas características se realiza mediante la correcta medición de la altura y anchura de la llama en píxeles, con base en los contornos delimitados por la desviación estándar del código, a través del apoyo de la herramienta «Regla» en MATLAB®. Esta herramienta permite medir cada espacio delimitado de cada característica geométrica

de la llama; por ejemplo, la figura 9 muestra que las características geométricas de la llama obtenidas en un promedio de fragmentos del video (figura 8) son 208.06 píxeles de largo por 13.03 píxeles de ancho.

• **Medición en píxeles**

Un píxel es un punto individual en una imagen digital que puede representar un color o un valor de brillo específico. En las imágenes en color, cada píxel generalmente está compuesto por tres subpíxeles, que representan los componentes de color rojo, verde y azul (RGB). Al combinar diferentes intensidades de estos tres colores en cada píxel, se pueden crear una amplia gama de colores. Para convertir una medida de píxeles a centímetros, es necesario conocer la densidad de píxeles o la resolución de la pantalla o la imagen. Esta densidad de píxeles se mide en píxeles por pulgada (PPP o DPI, por sus siglas en inglés), permitiendo determinar cuántos píxeles abarca una pulgada de la pantalla o la imagen. La fórmula básica para convertir píxeles a centímetros se muestra en la ecuación [1]. En el siguiente apartado

ECUACIÓN [1]

$$\text{CENTÍMETROS} = \text{PIXELES} / (\text{DENSIDAD DE PIXELES})$$

se muestran los resultados obtenidos a partir de dicha ecuación.

• Discusión de resultados

A continuación, se presentan las pruebas experimentales desarrolladas para comprobar el correcto funcionamiento de los códigos programados en MATLAB® y el análisis de las características de las llamas, llevados a cabo en distintos ambientes para observar su comportamiento. Las pruebas experimentales se realizaron en dos de los laboratorios de Ingeniería Química de la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP), en donde se tomaron varios videos de una llama, en diferentes lugares, para obtener una estadística en ambientes diversos. El mechero Bunsen utilizado, el flujo de combustible y la relación aire-combustible fue la misma para ambos casos de estudio.

• Caso 1. Llama en un ambiente abierto

El caso de estudio 1 es representado por una llama generada con un mechero Bunsen en un laboratorio, sin estar dentro de alguna campana de extracción; es decir, una llama generada en un espacio abierto (figura 10). En la figura 10 se muestra la foto de un fragmento del video obtenido en vivo de la cámara USB para su análisis con los códigos de MATLAB® en un ambiente abierto.

En la figura 11 se muestra el cambio de color a escala de grises de un fragmento del video de la llama, con una llama más nítida, que se expresa en un color totalmente negro en su parte inferior y marcando el contorno de la misma llama, para obtener un correcto análisis en las medidas de la desviación estándar.

En la figura 12 se muestra la extracción del contorno de la llama, remarcándose en las líneas blancas, para que los códigos de MATLAB® puedan establecer correctamente los contornos de la llama donde se va a marcar su medición (figura 12).

En la figura 13 se muestra la extracción de los principales puntos donde se limita la luz, a través del contorno delimitado en la figura 12. La altura, el ancho y las distancias se obtuvieron mediante el uso de la herramienta «Regla» de MATLAB®, la cual permitió observar que las medidas de cambio de intensidad de la llama fueron de 474.05 pixeles, 236.66 pixeles, y 130.12 y 115.38 pixeles, respectivamente.

• Caso 2. Llama en un ambiente cerrado

A continuación, se presenta una llama generada con un mechero Bunsen en un laboratorio, dentro de una campana de extracción (figura 14). En la figura 14 se muestra la captura de pantalla de un fragmento del video obtenido en vivo de la cámara USB en un espacio cerrado, caso de estudio 2.

En la figura 15 se muestra el cambio de color a escala de grises de un fragmento del video de la llama, obteniendo una llama poco visible; sin dejar de lado la observación de un color totalmente negro que se expresa en la parte inferior del mechero.

En la figura 16 se muestra la extracción del contorno de la llama, para que los códigos de MATLAB® puedan establecer correctamente los contornos donde se va a marcar su medición, a pesar de que las líneas de extracción del contorno de la llama son tenues (figura 16).

En la figura 17 se muestra la extracción de los principales puntos donde se limita la luz, a



LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES SE REALIZARON EN DOS DE LOS LABORATORIOS DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS PUEBLA (UDLAP).

través del contorno delimitado en la figura 16. Como se mencionó anteriormente, la altura, el ancho y las distancias se obtuvieron mediante el uso de la herramienta «Regla» de MATLAB®, la cual permitió observar que las medidas de cambio de intensidad de la llama fueron de 392.03 píxeles, 174.01 píxeles, y 117.32 y 100 píxeles, respectivamente.

A continuación, la tabla 3 muestra los valores en píxeles y centímetros para la altura y ancho de las llamas analizadas en ambos casos de estudio (*i. e.* ambientes abierto y cerrado, respectivamente). Estos valores fueron obtenidos a partir de la ecuación [1], presentada en la subsección «Medición de píxeles» de la sección «Metodología». Es así como la tabla 3 muestra las medidas de altura y ancho de las llamas obtenidas de las figuras 13 y 17.

Es importante mencionar que las imágenes mostradas en las figuras 13 y 17 corresponden a un valor promedio experimental; es decir, estas imágenes son el valor promedio de todos los fragmentos en los que se dividió cada grabación experimental en sistemas abiertos y cerrados, respectivamente. En el presente trabajo de investigación se realizaron diversas grabaciones en sistemas abiertos y sistemas cerrados; específicamente, se realizaron tres videos para cada condición experimental y el valor promedio para la altura y el ancho de la llama de estos videos es el reportado en la tabla 3 para cada caso.

• Cálculo de la radiación térmica emitida por dardos de fuego

El presente trabajo permite obtener las principales características geométricas del dardo de fuego (*i. e.* altura y ancho de la llama), relacionadas directamente con su alcance, a través del tratamiento de imágenes experimentales. De igual manera, la metodología muestra el comportamiento de los dardos de fuego, ayudando así a la prevención y mitigación de sus consecuencias.

ECUACIÓN [2]

$$H/D = 3.4Q^{*2/5} - 0.6$$

ECUACIÓN [3]

$$Q^* = \dot{Q} / \rho_a C_p T_a \sqrt{g D D^2}$$

Específicamente, a través de la obtención de la longitud de la llama mediante el tratamiento de imágenes y la utilización de las ecuaciones [2] y [3], obtenidas por Bradley *et al.* (2016), se ha estimado la radiación térmica emitida por los dardos de fuego de propano a escala laboratorio del presente estudio.

Las ecuaciones [2] y [3] muestran que las principales variables para el cálculo de la radiación térmica, Q , son el diámetro del orificio de salida del combustible, D , y la longitud de la llama, H . Esta última fue obtenida a través del procesamiento de imágenes. Mediante el uso de los valores del diámetro del orificio de salida de combustible en las pruebas experimentales igual a 4.5 cm y de la longitud de llama obtenidas en el presente estudio (tabla 3): (i) altura de la llama en el caso 1, ambiente abierto, igual a 9.12 cm, y (ii) altura de la llama en el caso 2, ambiente cerrado, igual a 10.32 cm, se procedió a calcular el valor de Q^* de la ecuación [2]. Los valores obtenidos fueron $Q^{*1} = 0.5$ kW y $Q^{*2} = 0.67$ kW, respectivamente.

Posteriormente, la radiación térmica, \dot{Q} , fue obtenida a través de la ecuación [3] con el uso de los valores de Q^* obtenidos previamente. Los valores de radiación térmica para las llamas de los casos 1 y 2 fueron $\dot{Q} = 1.1$ kW y $\dot{Q} = 1.4$ kW, respectivamente. Estos resultados demuestran que, por lo que respecta a las consecuencias debidas



EL PRESENTE TRABAJO PERMITE OBTENER LAS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DEL DARDO DE FUEGO, RELACIONADAS DIRECTAMENTE CON SU ALCANCE, A TRAVÉS DEL TRATAMIENTO DE IMÁGENES EXPERIMENTALES.

Tabla 3. Características geométricas de las llamas analizadas en el presente estudio.

Caso de estudio	Figura	Altura de la llama (píxeles)	Ancho de la llama (píxeles)	Densidad de píxeles/Resolución (ppp)	Altura de la llama (cm)	Ancho de la llama (cm)
Videos de prueba	9	208.06	13.03	102.4	2.03	0.13
Caso 1: ambiente abierto	16	474.05	236.66	52.0	9.12	4.55
Caso 2: ambiente cerrado	20	392.03	174.01	38.0	10.32	4.58

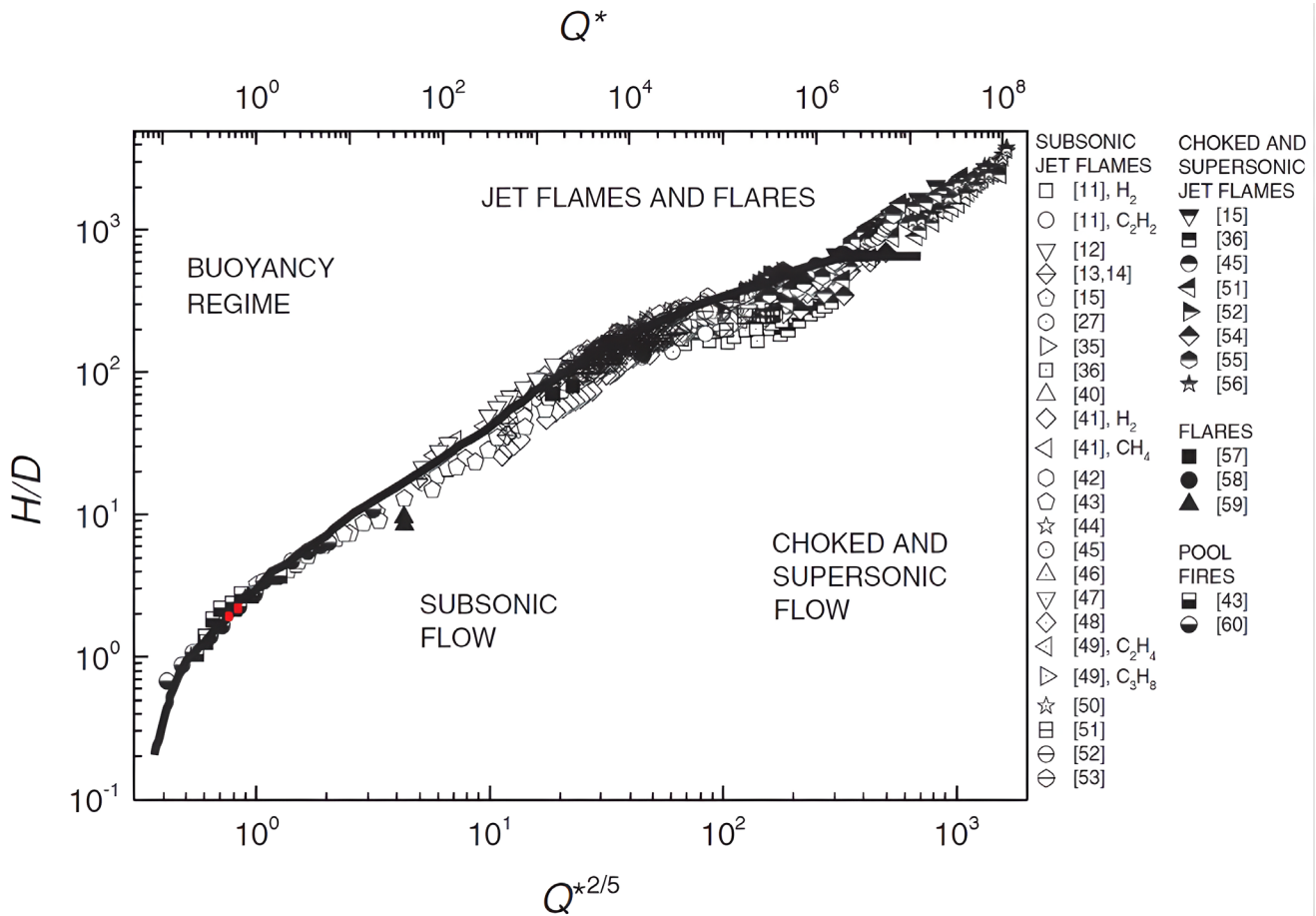


Figura 18. Altura de llama normalizada, H/D , en función de $Q^{*2/5}$. Modificada de Bradley *et al.* (2016). Los cuadrados rojos muestran los valores experimentales obtenidos en el presente estudio: $H/D = 2.0$, $Q^* = 0.5$ y $H/D = 2.3$, $Q^* = 0.67$ para los casos 1 y 2, respectivamente.

a la radiación térmica para dardos de fuego de estas características, el riesgo para las personas es mínimo y se encuentra limitado a distancias muy cortas a partir de la llama, ya que el límite «soportable» de radiación recibida por las personas es de alrededor de 5 kW (Casal, 2017), y esta intensidad de radiación no se presenta en los dardos de fuego analizados en este estudio.

Finalmente, estas dos llamas experimentales se insertaron en la figura 18, obtenida por Bradley *et al.* (2016), correspondiente a la base de datos más grande del mundo sobre dardos de fuego. La figura 18 muestra cómo los resultados de este estudio se encuentran en línea con los más de 880 dardos de fuego obtenidos por diversos autores entre 1949 y 2016. Los resultados obtenidos se encuentran señalados por los cuadrados rojos en los valores $H/D = 2.0$, $Q^* = 0.5$; y $H/D = 2.3$, $Q^* = 0.67$, para los casos 1 y 2, respectivamente, mostrando claramente cómo las

longitudes de llama obtenidas por el tratamiento de imágenes del presente estudio son confiables y reproducibles con estudios experimentales previos, realizados a escala laboratorio y con accidentes graves con fuego en escalas de ambientes reales.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente estudio se obtuvieron, mediante la programación de dos códigos en MATLAB®, las principales características geométricas de dardos de fuego, filmando las llamas en ambientes abiertos y cerrados, respectivamente. De los videos experimentales se obtuvieron las principales características geométricas de las llamas, con base en la desviación estándar que se presentó al convertir las imágenes de las llamas en formato de escala de grises y el contorno de las llamas. A continuación, se enlistan las principales conclusiones de este trabajo.

PRINCIPALES HALLAZGOS

1

A través del análisis de imágenes en MATLAB® y los códigos desarrollados con este *software*, se obtuvieron dos de las principales características geométricas de los dardos de fuego: altura y ancho de la llama (tabla 3), en distintos ambientes (sistemas abierto y cerrado); características necesarias para establecer las distancias de seguridad para las personas y los equipos en las instalaciones industriales.

2

Las medidas geométricas de las llamas obtenidas permitieron predecir la radiación térmica emitida por los dardos de fuego, a través del uso de ecuaciones reportadas en la literatura (ecuaciones [2] y [3]). Los valores de radiación térmica obtenidos para las llamas de los casos 1 (sistema abierto) y 2 (sistema cerrado) fueron $\dot{Q} = 1.1 \text{ kW}$ y $\dot{Q} = 1.4 \text{ kW}$, respectivamente.

3

La radiación térmica de dardos fuego a escala laboratorio fue calculada como una función del diámetro del orificio de salida del combustible y la longitud de la llama, esta última obtenida mediante el tratamiento de imágenes experimentales.

4

Los resultados obtenidos (cuadrados rojos en la figura 18) mostraron claramente cómo, conforme la longitud de la llama aumenta, el flujo de calor también aumenta. Estos resultados se alinean con el comportamiento de los más de 880 dardos de fuego obtenidos por otros autores de 1949 a 2016, utilizando varios combustibles, a escala laboratorio y en escalas de ambientes reales con accidentes graves con fuego.



**Diana Laura Lima
Bravo**

Estudiante de sexto semestre de Ingeniería Mecatrónica en la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP). Es miembro activo del

Programa de Honores UDLAP desde 2021.

diana.limabo@udlap.mx



**Eduardo Javier
Jiménez López**

Profesor de tiempo completo de la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP), con licenciatura en Electrónica y Comunicaciones y maestría en Ciencias con

especialidad en Electrónica de la UDLAP. Áreas de investigación: procesamiento digital y analógico de señales, análisis y diseño de circuitos eléctricos y electrónicos.

eduardoj.jimenez@udlap.mx



**Adriana Palacios
Rosas**

Profesora de tiempo completo de la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP). Doctora en Ingeniería de

Procesos Químicos por la Universidad Politécnica de Cataluña. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) nivel 2. Áreas de investigación: combustión, análisis de riesgos industriales, uso de hidrógeno con energías renovables, incendios y explosiones.

adriana.palacios@udlap.mx

• Agradecimientos

Este artículo es resultado del trabajo de investigación realizado por Lima Bravo, D. L., en la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) como miembro activo del Programa de Honores UDLAP.

REFERENCIAS

- American Petroleum Institute Recommended Practice 521. (2014). *Guide for Pressure-Relieving and Depressuring Systems*, 6th ed. Washington, DC: American Petroleum Institute. <https://www.api.org/~media/files/publications/whats%20new/521%20e6%20pa.pdf>
- Bradley, D., Gaskell, P.H., Gu, X.J. y Palacios, A. (2016). Jet flame heights, lift-off distances, and mean flame surface density for extensive ranges of fuels and flow rates. *Combustion and Flame*. 164, 400-409.
- Casal, J. (2017). *Evaluation of the effects and consequences of major accidents in industrial plants*. 2nd Edition. Elsevier. 553 pp. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-00740-4>
- Centro Nacional de Comunicaciones, Secretaría de Gobernación. (2023). *Incendios*. Universidad Nacional Autónoma de México, párr. 1. <https://www.unam.mx/medidas-de-emergencia/incendios>
- Gallangos, F. (2019). Explosión en Tlahuelilpan: Recuento de la tragedia. 10-02-19. *Quadratin*. <https://mexico.quadratin.com.mx/explosion-en-tlahuelilpan-recuento-de-la-tragedia/>
- García, K. (2020). Explosión en refinería de Pemex en Minatitlán deja siete heridos. *El Economista*, párr. 2. <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Explosion-en-refineria-de-Pemex-en-Minatitlan-deja-siete-heridos-20210407-0112.html>
- Gómez-Mares, M., Zárate, L. y Casal, J. (2008). Jet fires and the domino effect. *Fire Safety Journal*, 43(8), 583-588.
- Palacios, A., Muñoz, M. y Casal, J. (2009). Jet fires: an experimental study of the main geometrical features of the flame in subsonic and sonic regimes. *AIChE Journal*, 55(1), 256-263.
- Palacios, A., (2011). Study of jet fires geometry and radiative features. PhD Thesis. Chemical Engineering Department. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Palacios, A., Mata Miquel, C. y Barraza, C. (2021). Historical analysis of accidents in the Mexican chemical industry. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 20(1), 113-133.
- Rivera, R. (2020). Accidentes químicos. CENAPRED. <http://rmgir.proyectomesoamerica.org/portal/apps/Cascade/index.html?appid=9d-26834897164929846c3e716c0d9938>
- Suárez, K. (2021). Fuego en el mar: Pemex registra una fuga de gas en un ducto submarino en el golfo de México. *El País*, párr. 1. <https://elpais.com/mexico/2021-07-02/fuego-en-el-mar-pemex-registra-una-fuga-de-gas-en-un-ducto-submarino-en-el-golfo-de-mexico.html>