

Propuestas para reducir emisiones en yacimientos petrolíferos

Proposal to reduce emissions at oil fields

Miguel Ángel Díaz-Díaz¹<https://orcid.org/0000-0002-0633-3477>

Lester Rivas-Trasancos¹<https://orcid.org/0000-0001-9521-4420>

¹Centro de Investigación del Petróleo, La Habana, Cuba

*Autor para correspondencia: michael@ceinpet.cupet.cu

RESUMEN

El estudio de la incidencia negativa de la actividad de exploración – producción sobre el medio ambiente atmosférico no ha sido desarrollado de forma sistemática. El objetivo de este estudio ha sido definir modificaciones tecnológicas y operacionales para reducir emisiones en yacimientos petrolíferos. Para ello, se realizó una actualización bibliográfica sobre el diseño y operación de antorchas (*flares*) en tierra, que abarcó el período de los últimos 15 años. Se estimaron los parámetros fundamentales de llamas de las instaladas en los yacimientos del litoral norte de las provincias Mayabeque y Matanzas como función de la velocidad de salida de las chimeneas, la relación estequiométrica de mezclado y la velocidad del viento. Las eficiencias de las antorchas instaladas en los yacimientos del litoral norte de las provincias Mayabeque y Matanzas son inferiores al 40%, lo cual denotó una combustión deficiente que puede originar niveles elevados de H₂S en toda la región donde se ubican. El incremento de la eficiencia de la combustión en los venteos se puede lograr mediante una disminución del flujo de gases y el incremento en la temperatura de llama y/o el diámetro.

Palabras clave: combustión; flares; emisiones; yacimientos.

ABSTRACT

The study of the negative incidence of exploration - production activity on the atmospheric environment has not been systematically developed. The objective of this study has been to define technological and operational modifications to reduce emissions in oil deposits. To do this, a bibliographic update on the design and operation of flares on land, which covered the period of the last 15 years. The fundamental parameters of flames of those installed in the oil fields of the northern coast of the Mayabeque and Matanzas provinces estimated as a function of the exit speed of the chimneys, the stoichiometric ratio of mixing and the wind speed. The efficiencies of the flares installed in these oil fields are below 40%, which denoted poor combustion that can cause high levels of H₂S throughout the region where they are located. The increase in combustion efficiency in vents can achieve by decreased gas flow and the increase in flame temperature and/or diameter.

Keywords: combustion; flares; emissions; oilfields.

Recibido: 10/05/2023

Aceptado: 18/08/2023

Introducción

La necesidad de armonizar el desarrollo tecnológico con la preservación del ambiente, constituye uno de los problemas a resolver por la humanidad. En Cuba, el estudio de la incidencia negativa de la actividad de exploración-producción sobre el medio ambiente atmosférico no ha sido desarrollado de forma sistemática. Entre otros aspectos, la evaluación de la eficiencia real de combustión de las antorchas o venteos reviste gran importancia debido a la contaminación originada por estas emisiones y las consecuencias que provocan.

En los yacimientos al norte de las provincias Mayabeque-Matanzas se localizan un grupo de antorchas, cuyas emisiones impactan de formas diversas las zonas

urbanas y rurales aledañas. El objetivo de este estudio ha sido definir modificaciones tecnológicas y operacionales para reducir emisiones en yacimientos petrolíferos.

Fundamentación teórica

Los contaminantes atmosféricos generados y emitidos durante el proceso de exploración - producción de petróleo inciden en la calidad del aire y están relacionados con las emisiones provocadas por actividades del hombre y por las características propias del medio ambiente. La quema y venteo del gas asociado con la producción de petróleo crudo está estimada en más de 100 billones de metros cúbicos por año en el mundo, lo que ha incrementado la atención con el enfoque internacional sobre la conservación de la energía y el cambio climático global.⁽¹⁾ El gas asociado o acompañante cuando se dispone a la atmósfera en instalaciones en tierra por venteo o quema, es una práctica reconocida como un desecho de un recurso de valor, como fuente significativa de emisiones de gases de efecto invernadero (GHG por sus siglas en inglés), de formación de NO_x y de lluvia ácida en áreas donde se quema por las temperaturas alcanzadas.

Algunas veces es necesario eliminar el exceso de gas y ocasionalmente líquidos de una facilidad de petróleo y gas, y para esto, la manera más segura es con el sistema de antorchas. El mismo consiste de una combinación de tuberías y equipo especializado que recoge los hidrocarburos liberados de las válvulas de alivio, soplado, control de presión y venteos manuales, los que se disponen por combustión a una locación remota y segura.⁽²⁾

Basado en una serie de estudios de antorchas conducidos en los años 80, la EPA concluyó que las mismas diseñadas y operadas apropiadamente alcanzan una buena eficiencia de combustión,⁽³⁾ tal como una conversión mayor del 98% de compuestos orgánicos a dióxido de carbono. Sin embargo, se debe entender que bajo condiciones extremas ambientales y de operación, la eficiencia de la combustión sufrirá afectaciones en algún grado.⁽⁴⁾ Para definir la envoltura estable de llama de condiciones de operación, las regulaciones resultantes para las

antorchas incluyen los requerimientos del valor calórico neto mínimo del gas de venteo y un límite en la velocidad como una función del valor calórico neto.

Los factores que pueden reducir su capacidad de destrucción incluyen la sobrealimentación de vapor, exceso de aireación, vientos altos y caída de llama.⁽⁵⁾

Para mantener una buena eficiencia de combustión, en específico para una antorcha asistida por aire, la relación estequiométrica de aire debe ser 7 o menos.⁽⁶⁾

Los estudios sugieren además que el límite inferior de inflamabilidad (LFL por sus siglas en inglés) del gas de venteo debe ser 15,3 % por volumen o menos para asegurar que el gas enviado a la antorcha asistido por aire sea capaz de quemarse adecuadamente cuando se introduce suficiente aire.^(7,8) El LFL es una

propiedad química importante cuando se considera la habilidad de combustionar de una mezcla de gases y es la concentración más baja en la cual se quemará la mezcla en aire.^(9,10) Las mezclas con LFL relativamente elevado son menos inflamables cuando se liberan al aire que las mezclas con LFL relativamente bajo.

Los gases inertes reducen el rango inflamable de la mezcla aire/gas (incrementa el LFL) y parte del calor de la reacción de combustión se absorbe por los gases inertes,⁽¹¹⁾ lo cual enfría la llama y disminuye la propagación de la combustión.

El principio de Le Chatelier ha sido utilizado para estimar el límite inferior de inflamabilidad de cualquier mezcla de gas (LFL), expresado en % volumen, en la zona de combustión, usando el recíproco del volumen promedio pesado sobre el LFL de cada componente individual, según la ecuación (1).⁽⁷⁾

$$\text{LFL} = \frac{100}{\sum (X_j/\text{LFL}_j)} \quad (1)$$

donde

LFL es el límite inferior de inflamabilidad,

X_j es la concentración del componente puro individual en la mezcla de gas y

LFL_i es el límite inferior de inflamabilidad del componente puro individual en la mezcla de gas. Los datos experimentales que se han obtenido de mezclas de hidrógeno, nitrógeno y metano se pueden utilizar para determinar cada LFL parcial en la mezcla.⁽¹²⁾

La operación de la antorcha no se afecta significativamente por velocidades de viento hasta 35 km/h.⁽¹³⁾

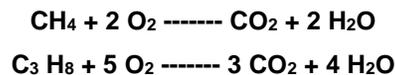
La eficiencia de destrucción es una medida de cuanto hidrocarburo se destruye y la eficiencia de combustión es una medida de la cantidad de hidrocarburos que se quema completamente para producir dióxido de carbono y vapor de agua. La eficiencia de combustión siempre será menor que la de destrucción, y una antorcha que opera con una eficiencia de combustión del 98% puede alcanzar una eficiencia de destrucción sobre el 99,5%.⁽¹⁴⁾ La relación entre eficiencia de destrucción y de combustión no es constante y cambia con diferentes compuestos, se cree que el estimado de diferencia de 1,5 % se puede asumir razonablemente. Se ha determinado que una eficiencia de combustión del 96,5% demuestra una buena operación.⁽¹⁵⁾

El vapor se utiliza en algunos casos para proteger la punta o boca de la antorcha, así como para promover la quema sin humos, para esto es fundamental tener suficiente momentum de gas residual y cantidad de aire para alcanzar combustión completa. La inyección de vapor es la técnica más común para añadir momentum a los gases de baja presión y participa en la química del proceso de combustión,⁽¹⁶⁾ el vapor reaccionará con las partículas calientes de carbono en los inquemados para removerlas antes de que puedan enfriarse y formar humo, así como reaccionará con los productos intermedios de la combustión para formar compuestos que se queman fácilmente a temperaturas más bajas.⁽¹⁷⁾

El efecto de enfriamiento por el uso excesivo de vapor puede realmente inhibir la dispersión de los gases quemados y en casos extremos puede exhalar la llama y dejar que entren a la atmósfera gases residuales sin quemar.⁽¹⁵⁾ De forma similar a cuando se utiliza vapor, la inyección de aire puede promover la quema sin humos en una antorcha, pues añade momentum y turbulencia a la zona de combustión, lo cual mejora el mezclado y reduce la posibilidad de formación de humos. Puesto

que el aire adicional es inducido en el gas residual, le suministra el oxígeno necesario para aumentar la capacidad de eliminar humos.⁽¹⁶⁾ Sin embargo, al igual que con el uso de vapor, demasiado aire (aireación en exceso) puede provocar desestabilización en la llama, decreciendo la eficiencia de combustión.

La cantidad teórica estequiométrica molar de aire requerida para la combustión varía entre los diferentes hidrocarburos combustibles y se puede determinar por una ecuación balanceada de reacción de combustión, como las que se muestran para metano y propano, respectivamente.



Asumiendo que el aire ambiente contiene aproximadamente 21 % de oxígeno y usando los pesos moleculares para metano, propano y aire, se obtienen las relaciones estequiométricas aire/ combustible de 17,1 kg de aire/ kg de metano y 15,6 kg de aire/ kg de propano. Los resultados de un estudio de la TCEQ ⁽¹⁸⁾ muestran que, en general, al añadir más aire asistido al gas de venteo de la antorcha, la eficiencia de combustión se deteriora.

La EPA establece que, en muchas antorchas, la combustión ocurre por medio de una llama de difusión, en la cual el aire se difunde a través de la frontera de la corriente combustible/ productos de combustión hacia el centro del flujo de combustible, formando una envoltura de la mezcla de gas combustible alrededor de un corte de gas combustible. En la ignición, esta mezcla de gas combustible establece una zona de llama estable alrededor del corte de gas por encima de la punta de la antorcha.

El corte interior de gas se calienta por difusión de los productos de combustión calientes producidos en la zona de llama, ⁽¹⁹⁾ sugieren que predecir el tamaño (longitud, diámetro, área y volumen) de una llama de difusión se debía utilizar para estimar su eficiencia de combustión, porque según se reduce el tamaño de una llama, menos oxígeno entra a la misma.

Se ha señalado que si las dimensiones de una llama dependen de las variables meteorológicas (ej., viento), la eficiencia de combustión pudiera depender también de estas. Una velocidad de viento transversal elevada puede tener un fuerte efecto sobre las dimensiones y forma de la llama.

Los principales factores que afectan la eficiencia de combustión son la inflamabilidad, la temperatura de auto-ignición, el valor calórico neto, la densidad y la zona de mezclado de llama de los gases en la zona de combustión.⁽²⁰⁾

Los límites de inflamabilidad de los gases quemados influyen en la estabilidad de ignición y la extinción de la llama y se definen como los límites de composición estequiométrica (máximo y mínimo) de una mezcla oxígeno-combustible que quemará indefinidamente a condiciones dadas de temperatura y presión sin más ignición. Los gases deben estar dentro de sus límites de inflamabilidad para quemar. Cuando estos límites son estrechos, el interior de la llama puede tener insuficiente aire para quemar la mezcla.

Los combustibles, tales como el hidrógeno, con amplios límites de inflamabilidad, son más fáciles de combustionar. Para muchas emisiones de gas residual de antorchas, el valor calórico neto también afecta la estabilidad de la llama, las emisiones y la estructura de la llama. Un valor calórico neto más bajo produce una llama más fría que no favorece la cinética de combustión y se extingue más fácil. La temperatura de llama más baja también reduce las fuerzas de dispersión y por tanto el mezclado.

El mezclado pobre en la boca de la antorcha es la causa primaria de humos cuando se quema un material dado. Las corrientes con elevada relación molar carbono/hidrógeno (mayor de 0,33), las cadenas ramificadas de parafinas, más que los isómeros normales, y los hidrocarburos no saturados tienen una mayor tendencia a dar humos y requieren mejor mezclado para quemar sin humos.⁽²⁾

Cuando se requiere combustión sin humos y no se puede alcanzar mediante la energía/ momentum accesible de la corriente de gas, será necesario usar un medio asistido tal como aire o vapor. El vapor es el medio más común y generalmente accesible fácilmente en una refinería. Las antorchas asistidas por aire utilizan un gran volumen de aire de baja presión generado por un soplador, el

cual se mezcla con el gas en la punta de la antorcha.⁽⁴⁾ La localización y elevación de la antorcha es una consideración de diseño fundamental determinada principalmente por la radiación permisible. En las facilidades en tierra (onshore), la decisión es gobernada frecuentemente por su proximidad a otros equipos de procesos, frontera de plantas, dirección de viento predominante y el costo de la estructura de soporte asociada. En las facilidades offshore, las opciones están limitadas a la torre montada en la plataforma y a la torre unida al puente. Los límites de diseño de radiación recomendados son suministrados en API 537.⁽²¹⁾

Las condiciones del sitio, tales como dirección de viento, radiación solar y humedad, tienen un efecto sobre la radiación mostrada y además deben ser comunicadas al fabricante durante la fase de diseño. La protección de radiación en las plataformas offshore es lugar común para proteger más las plantas de procesos adyacentes. Se debe utilizar también *sprays* de agua.⁽²⁰⁾

La medición de las emisiones de una antorcha puede ser difícil y peligrosa debido a la carencia de una cámara de combustión cerrada. Además, puede ser elevada y con diseños y tamaños muy diferentes. Con la ocurrencia de la combustión en y sobre la punta de la misma, los gases quemados se liberan a la atmósfera en cualquier dirección, dadas las condiciones meteorológicas y la velocidad del gas de venteo que exista en ese momento.

Dentro de cada tipo general de antorcha, pueden existir varias alternativas y aspectos de diseño apropiados ⁽²¹⁾, estos son: asistidos por aire, asistidos por vapor, asistidos por gas, de alta presión, multi-puntas, de emergencia, Back-Up, industriales, de procesos, sin humos, en tierra, de tubo, elevados y abiertos.

Las antorchas se categorizan generalmente en dos formas:⁽²¹⁾ por la altura de la punta (en suelo o elevado) y por el método de enriquecimiento mezclado en la punta (asistido por vapor, asistido por aire o no asistido). La elevación puede prevenir condiciones potencialmente peligrosas a nivel de suelo donde la llama abierta (una fuente de ignición) se localiza cerca de una unidad de proceso. Además, los productos de la combustión pueden ser dispersados sobre áreas de trabajo para reducir los efectos de ruido, calor, humos y olores. En muchas antorchas, la combustión ocurre por medio de una llama de difusión que difunde el

aire a través del estrato de la corriente de producto/combustible hacia el centro del flujo de combustible, formando la envoltura de una mezcla gas/combustible alrededor de un corte del gas combustible.

Entre los tipos de antorchas elevadas, se pueden citar los desarrollados por MRW Technologies Inc.,⁽²²⁾ los cuales cumplen con los requerimientos de la EPA ⁽³⁾ y tienen una eficiencia de destrucción del 98 %.

Los componentes principales y opcionales para una antorcha elevada ⁽²²⁾ son: quemador con o sin supresión de humos y capacidad de control (opcional), pilotos, pilotos de ignición, detectores de llama pilotos, sello de velocidad (opcional), estructuras de soporte, conexión a tierra, sello líquido (opcional), tubería, sistema de control de supresión de humo (opcional), sopladores (opcional), flujo, composición, contenido de calor o video de monitoreo, laterales y plataformas, luces y pintura para alertar aviones, protección de calor de radiación y protección de lluvia.

Entre las consideraciones básicas en el diseño de antorchas elevados, los mismos deben tener siempre un contenido de calor mínimo, por ejemplo, asistidos por vapor (2670 kcal/m^3), asistidos por aire (2670 kcal/m^3), no asistidos (1780 kcal/m^3), la velocidad en la boca de salida es limitada basada en el contenido de calor en la corriente de la antorcha, esta es la velocidad del gas en el punto donde sale la punta, no en la cabecera misma.

Otra consideración debe ser las puntas o bocas de antorchas para lograr operaciones sin humos. Varios tipos de puntas son accesibles en dependencia de la localización y los requerimientos específicos de diseño:⁽²⁾ sónico, tipo tubo (sub-sónico), combinado y asistidos por aire o vapor. Las antorchas sónicas se emplean en sistemas de alta presión donde la presión accesible es elevada. La emisividad (o factor F) de una antorcha sónica está entre 0,07-0,15 y es mucho más bajo que uno del tipo tubo, resultando niveles de radiación reducidos para un flujo de gas dado y una chimenea de antorcha más baja. La emisividad es la fracción de calor generado en una punta de antorcha que se irradia en los alrededores. Las de tipo tubo se emplean para sistemas de baja presión donde la presión accesible es pequeña y el factor típico está entre 0,20-0,35.

El sello molecular se localiza justo debajo de la punta de la antorcha y se diseña para prevenir el ingreso de aire en la chimenea del flare a bajos flujos. El sello molecular minimiza la cantidad de uso continuo de gas de purga. El gas fluye normalmente hacia arriba y se vira 180° hacia la dirección del flujo. Los gases más ligeros que el aire tienden a recogerse en el doblez superior, sellando la chimenea contra el flujo trasero de aire. Los gases más pesados tienden a sedimentar en el doblez más bajo. Se requiere conectar un drenaje en la base del cilindro exterior para remover cualquier líquido acumulado.^(2,14)

Consideraciones en el diseño de chimeneas de antorchas

- Radiación: radiación límite continua y picos, sobre las personas y el sitio, equipo, construcciones y personal de la instalación.
- Gas inflamable: evitar ignición de nube de gas inflamable liberada de un venteo frío o en caso de que se apague la llama.
- Dispersión de gas y peligros tóxicos: principalmente para H_2S y SO_2 , pero no limitado a estos, limita el riesgo de que una nube de gas tóxico alcance a población fuera del sitio, suministrar medios de alarma y protección adecuada al personal presente en el área restringida.
- Ruido: límite de ruido continuo y pico.
- Altura de chimenea basada en nivel permisible de radiación.
- Una chimenea más alta resultará en una zona estéril más pequeña.
- Localizar la planta de procesos vientos arriba de la antorcha.

La altura de la antorcha se determina basada en las limitaciones a nivel de suelo, de la intensidad de radiación térmica, luminosidad, ruido, altura de las estructuras circundantes y la dispersión de los gases de escape.⁽²⁰⁾ Además, se debe considerar también la dispersión de la pluma en caso de fallos de ignición de la emisión. Las antorchas industriales se diseñan normalmente para una intensidad de calor máxima cuando quema al flujo máximo de diseño.

La ecuación (2) de Hajek y Ludwig se puede utilizar para determinar la distancia mínima H (expresada en m), requerida desde el centro de la llama de la antorcha y un punto de exposición donde la radiación térmica debe ser limitada.⁽²⁰⁾

$$H^2 = \frac{\tau f R}{4 \pi K} \quad (2)$$

donde

H: es la distancia mínima (altura) de la llama y donde la radiación debe ser limitada, τ es la fracción de intensidad de calor transmitida, f es la fracción de calor irradiado, R es liberación neta de calor y K es radiación máxima permisible.

Las opciones de chimeneas de antorchas en tierra (*onshore*) incluyen,⁽²⁾ por ejemplo, vertical elevado (más costoso que el de suelo, requiere menos espacio, según la llama se eleva, se reduce la radiación a nivel de suelo), en el suelo encerrado para reducir el ruido y la radiación externa (apropiado para flujos medios y bajos), en el suelo abierto (se liberan gases y líquidos al flare sobre el suelo, apropiado para grandes flujos de gas) y en el suelo equipado con varias etapas de quemadores, cada uno a diferente presión. Los aspectos más relevantes encontrados con respecto al tema se pueden resumir en:

1. El estado del arte indica que se requiere de un monitoreo global permanente de los contaminantes potenciales y de la observación de los efectos biológicos adversos sobre los ecosistemas para el estudio de la contaminación.
2. El gas asociado o acompañante cuando se dispone a la atmósfera en facilidades en tierra por venteo o quema, es una práctica reconocida como un desecho de un recurso de valor, como fuente significativa de emisiones de gases de efecto invernadero, de formación de NO_x y de lluvia ácida en áreas donde se quema por las temperaturas alcanzadas en la antorcha.
3. En Cuba el estudio de la incidencia negativa de la actividad de exploración-producción sobre el medio ambiente atmosférico no ha sido desarrollado de forma sistemática. Entre otros aspectos, la evaluación de la eficiencia real de combustión de las antorchas reviste gran importancia debido a la

contaminación originada por estas emisiones y las consecuencias que provocan.

Métodos utilizados y condiciones experimentales

Se realizó una revisión bibliográfica sobre el diseño y operación de antorchas en tierra, que abarcó el período de los últimos 15 años, con vistas a obtener información sobre la operación de las antorchas para mejorar la eficiencia de combustión, teniendo en cuenta que en las áreas de los yacimientos al norte de las provincias Mayabeque-Matanzas se localizan un grupo de estas, cuyas emisiones impactan de formas diversas las zonas urbanas y rurales aledañas.

A partir de las ecuaciones desarrolladas por algunos autores⁽²³⁾, y las evaluaciones teórico-prácticas realizadas ^(19,23)se estimaron las longitudes, áreas y volúmenes de llamas de las antorchas instaladas en los yacimientos referidos como función de la velocidad de salida de las chimeneas, la relación estequiométrica de mezclado y la velocidad del viento.

Se estimaron los calores liberados como parte del proceso de combustión a partir del conocimiento de las dimensiones de la llama asumiendo una temperatura de llama de 1200 K (927 °). Se obtuvo la eficiencia de combustión tomando la relación de los valores estimados de calor real liberado a los asociados con una combustión completa del 100%. Para ello se utilizaron los datos presentados en la tabla 1.

Tabla 1-Datos básicos de las antorchas

ANTORCHAS	Altura de antorcha	Diámetro de antorcha	Flujo de gas
	H (m)	D (m)	Q (m ³ /d)
BY	33,5	0,22	16 700
CCS	25,0	0,30	22 000
SC 300	27,3	0,22	57 000
SC 200	25,0	0,30	25 536
SC 100	28,3	0,22	2 693

Resultados y discusión

Los resultados fundamentales sobre la operación de las antorchas instaladas en los yacimientos del litoral norte de las provincias Mayabeque y Matanzas se muestran en la tabla 2. Las pérdidas de calor de la llama reflejaron el proceso de combustión deficiente que origina el tipo de antorcha empleada en estos yacimientos.

Tabla 2- Resultados fundamentales sobre la operación

FLARES	Calor sensible ganado por el aire (J/s)	Calor perdido por la llama por radiación (J/s)	Pérdida de calor de la llama (J/s)	Calor liberado de combustión completa (J/s)	Eficiencia de combustión (%)	Altura efectiva de emisión (m)
BY	538 436	1 675 066	2 213 501	7 441 551	30	37,93
CCS	984 090	2 651 616	3 635 706	980 3241	37	30,05
SC 300	987 973	2 375 402	3 363 375	25 399 306	13	35,31
SC 200	1 060 229	2 853 120	3 913 349	11 378 889	34	30,43
SC 100	214 746	521 346	736 092	1 200 006	61	30,18

Las eficiencias de combustión obtenidas, tomando la relación de los valores estimados de calor real liberado a los asociados con una combustión completa del 100%,⁽¹⁹⁾ resultaron menores al 40 %, lo cual implica que casi un 60 % del H₂S se emite a la atmósfera sin quemar, excepto para la antorcha del SC-100. La mayor eficiencia estimada correspondió a la antorcha del SC-100 con un 61 %, mientras

la más deficiente resultó la de SC-300 con apenas un 13%. En general, se observó para todas, una combustión deficiente que puede originar niveles elevados de H₂S en toda la región donde se ubican.

Con vistas a lograr una mayor eficiencia en la combustión de las antorchas instaladas en estos yacimientos se requiere modificar algunos parámetros operacionales, aunque esto no garantizará una disminución sensible de la contaminación que originan estas emisiones. Con una disminución del flujo de gases, un incremento en la temperatura de llama y/o en el diámetro se puede alcanzar cierta mejora de la eficiencia en la combustión.

Si se instalaran antorchas de 0,5 m de diámetro en sustitución de las existentes en SC-300, SC-200 y CCS, y se disminuyera a la mitad el flujo de gas quemado en el SC-300, se pudieran alcanzar eficiencias del 60 %, aún sin tener en consideración otros elementos relacionados con su diseño y operación.

Se debe señalar que en el caso de la antorcha de los pozos SC-200 se localiza un campamento a 187 m vientos abajo del flare y la tribuna, un área urbana de Santa Cruz del Norte a 858 m, recibiendo ambos el impacto de estas emisiones. Para eliminar la afectación a estos dos puntos habitados se requiere en el caso del campamento, trasladar el mismo 400 m hacia el NE, vientos arriba del flare y elevar la altura de la emisión hasta 35 m, con lo cual se logran los valores de concentración aceptables para el aire de puntos habitados a partir de 800 m de la fuente emisora para el H₂S y de 400 m para el SO₂. Se debe tener en cuenta que la combustión depende también de la composición del gas, su velocidad y las condiciones de viento. En la tabla 3 se muestran las emisiones estimadas de contaminantes (expresadas en kg/d), según los factores de emisión para la categoría de fuentes 1.B.2.c venteo y antorchas en la extracción de petróleo y gas.⁽²⁴⁾

Tabla 3- Emisiones estimadas de contaminantes (kg/d)

FLARES	NOx	COV	CO
BY	200	1,67	16,7
CCS	264	2,20	22,0
SC 300	684	5,70	57,0
SC 200	306	2,55	25,5
SC 100	32	0,27	2,7

Aunque las antorchas no pueden ser eliminadas, hay potencial para reducir la cantidad de gas quemado y se pudieran valorar algunas de las tecnologías actuales para reducirlos. Las posibles medidas que se proponen son:

- sistemas de protección de presión de alta integridad (HIPS): las fugas de gas se recogen y se reincorporan al sistema de proceso,
- uso de nitrógeno como un gas de purga para evitar explosiones (blanqueo) y desoxigenación de agua,
- re-inyección del gas en reservorios de gas,
- incremento de posibilidades para transporte y capacidad de almacenamiento de gas,
- aprovechamiento al máximo el gas asociado en los yacimientos estudiados,
- implementación de medidas de reducción de la fuente de gas en la máxima extensión posible,
- modificación y/o rediseño de las antorchas instaladas,
- uso de puntas eficientes y optimizar el tamaño y número de boquillas del quemador,
- maximización de la eficiencia de combustión controlando y optimizando el flujo aire/ combustible.
- minimización de la quema de purgas y pilotos sin comprometer la seguridad mediante la instalación de un medio de reducción de gas de purga, unidad de recuperación de gas, purga de gas inerte, tecnología de sello de válvula blando, donde sea posible, e instalación de pilotos de conservación,
- minimización de riesgos de apagado del piloto, asegurando velocidad de salida suficiente y guarda vientos.

Se recomienda evaluar la factibilidad de aplicación de estas medidas y los costos para las variantes requeridas.

Conclusiones

1. Las eficiencias de las antorchas instaladas en los yacimientos del litoral norte de las provincias Mayabeque y Matanzas son inferiores al 40 %, lo cual denotó una combustión deficiente que puede originar niveles elevados de H₂S en toda la región donde se ubican.
2. El incremento de la eficiencia de la combustión en los venteos se puede lograr mediante una disminución del flujo de gases y el incremento en la temperatura de llama y/o el diámetro.

Referencias bibliográficas

1. HAGOS, F.Y., ABD AZIZ, A.R., ZHARIF ZAINAL, E., MOFIJUR, M., FORRUQUE AHMED, SH. Recovery of gas waste from the petroleum industry: a review. Environmental Chemistry Letters. 37pp. DOI: 10.1007/s10311-021-01345-1 November 2021.
2. KEYNES, M. Flare System Design for oil and gas installations. IChemE. 2020.
3. EPA. Parameters for Properly Designed and Operated Flares. Report for Flare Review Panel. U.S. EPA Office of Air Quality Planning and Standards. 2012.
4. ARGO FLARES. 2.0 Flare types. <http://www.argoflares.com/>. 2013.
5. SCHRÖDER, V., MOLNARNE, M. Flammability of gas mixtures. Part 1: Fire potential. Journal of Hazardous Materials **121** (1-3), 37-44. 2005. ISSN 2772-4166. <http://www.sciencedirect.com/journal/>.

6. GOGOLEK, P., CAVERLY, A., SCHWARTZ, R., SEEBOLD, J., POHL, J. Emissions from elevated flares - A survey of the literature. International Flaring Consortium. 2010. <https://collections.lib.utah.edu> › ark.
7. DEGGES, M. J., BOYER, J.E., KUO, K.K., BASINI, L. Influence of steam on the flammability limits of premixed natural gas/oxygen/steam mixtures. *Chemical Engineering Journal* **165**(2): 633-638. 2010. ISSN: 1873-3212.
8. EVANS, S., ROSELER, D. Establishing a dynamic indicator of flare performance using lower flammability limits. Marathon Petroleum Company, LLC. 2011. <https://www.marathonpetroleum.com>
9. KONDO, S, K. *et al.* A study on flammability limits of fuel mixtures. *Journal of Hazardous Materials* **155**(3): 440-8. 2008. ISSN 2772-4166.
10. VIDAL, M., WONG, W., ROGERS, W.J., MANNAN, M.S. Evaluation of lower flammability limits of fuel-air-diluent mixtures using calculated adiabatic flame temperatures. *Journal of Hazardous Materials* **130** (1-2), 21-7. 2006. ISSN 2772-4166. <http://www.sciencedirect.com/journal/>.
11. MOLNARNE, M., MIZSEY, P., SCHRÖDER, V. Flammability of gas mixtures. Part 2: influence of inert gases. *Journal of Hazardous Materials* **121** (1-3), 45-9. 2005. ISSN 2772-4166. <http://www.sciencedirect.com/>.
12. WANG, T., CHEN, C., CHEN, H. Nitrogen and carbon dioxide dilution effect on upper flammability limits for organic compound containing carbon, hydrogen and oxygen atoms. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **41**(4), 453-464. 2010. Online ISSN: 1876-1089.
13. HU, E., HUANG, Z., HE, J., JIN, C., ZHENG, J. Experimental and numerical study on laminar burning characteristics of premixed methane–hydrogen–air flames. *International Journal of Hydrogen Energy* **34**(1): 4876-4888. 2009. Online ISSN: 1879-3487.
14. KOLMETZ, K. Process flare systems safety, selection, sizing, and troubleshooting. Handbook of process equipment design. 24pp. 2020.
15. PETERSON, J., TUTTLE, N., COOPER, H., BAUKAL, C. Minimize facility flaring. *Hydrocarbon Processing* **86**(6): 111–115. 2007. ISSN 0887-0284.

16. CASTIÑEIRA, D., EDGAR, T. F. CFD for simulation of steam assisted and air assisted flare combustion systems. *Energy and Fuels***20**:1044-1056. 2006. ISSN: 0887-0624.
17. WANG, J., HUANG, Z., TANG, C., MIAO, H., WANG, X. Numerical study of the effect of hydrogen addition on methane–air mixtures combustion. *International Journal of Hydrogen Energy***34** (2), 1084-1096. 2009. Online ISSN: 1879-3487. <http://www.sciencedirect.com/journal/>.
18. ALLEN, D. T., TORRES, V. M. 2010 Flare study final report. Texas Commission on Environmental Quality, Tracking No. 2008-81. <http://www.tceq.texas.gov/>. 2011.
19. LEAHEY, D. M., STROSHER, M., PRESTON, K. Theoretical and observational assessments of flare efficiencies. Ex. 2082: 1-14. Calgary. 2001.
20. USEPA. Flares Cost Manual. Section 3. VOC Controls. Chapter 1. Flares. 7th edition. 71pp. 2019.
21. API STANDARD 537. Flare Details for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries. THIRD EDITION, 196pp. MARCH 2017.
22. MRW TECHNOLOGIES INC. Basic Elevated Flare Design Considerations. Per 40 CFR 60 AP 42 TCEQ. <http://www.mrw-tech.com/>. 2013.
23. LEAHEY, D., SCHROEDER, M. B. *Atmospheric Environment***24A**: 2527-2529. 1990. Online ISSN: 1878-2442.
24. EMEP/EEA. Oil – Exploration, production, transport. Emission inventory guidebook 2009, updated June 2010. <http://www.eea.europe.eu/>.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no hay conflictos de intereses

Contribución de los autores

Miguel Ángel Díaz-Díaz: realizó la concepción de la investigación, revisión bibliográfica sobre el diseño y operación de antorchas, procesamiento de resultados y confección y revisión del manuscrito.

Lester Rivas-Trasancos: participó en revisión bibliográfica y del manuscrito, recopilación de datos básicos y procesamiento de resultados.