

Diseño de un sistema de Tea para un campo petrolero colombiano de acuerdo con la
norma estándar API-521

Miguel Antonio Plazas Muñoz

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas
Escuela de Ingeniería de Petróleos
Especialización en Ingeniería de Gas
Bucaramanga

2024

Diseño de un sistema de Tea para un campo petrolero colombiano de acuerdo con la
norma estándar API-521

Miguel Antonio Plazas Muñoz

Trabajo de grado para optar al título de Especialista en Ingeniería de Gas

Director

Manuel Enrique Cabarcas Simancas

Magíster en Ingeniería Química - UIS

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Especialización en Ingeniería de Gas

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Este trabajo de grado está dedicado con todo mi amor y gratitud a mi esposa Rocio y a mi hija Isabel Sofia. Amada esposa, tu apoyo incondicional y tu amor han sido mi inspiración constante y mi fortaleza en los momentos más difíciles. Hija hermosa, tu alegría y curiosidad me motivan a seguir adelante y a esforzarme por ser un ejemplo para ti. A ambas, les agradezco por ser mi razón de ser y por acompañarme en cada paso de este camino. Este logro es tanto suyo como mío.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander, en especial a la Escuela de Ingeniería de Petróleos, por brindarme la oportunidad y los recursos necesarios para llevar a cabo este trabajo de grado. Agradezco de manera especial a mi director de monografía, Msc Manuel Cabarcas Simancas, por su invaluable guía, conocimiento y apoyo durante todo este proceso. También quiero extender mi gratitud al evaluador de mi trabajo de grado, Msc Nicolás Santos Santos, por sus valiosas observaciones y comentarios. A cada uno de los profesores de las distintas asignaturas, gracias por compartir su sabiduría y contribuir a mi formación profesional. Finalmente, a mis compañeros de especialización, gracias por el apoyo y por los momentos compartidos que enriquecieron esta experiencia académica.

Tabla de contenido

1. OBJETIVOS	21
1.1. Objetivo general.....	21
1.2. Objetivos específicos	21
2. MARCO NORMATIVO Y TEÓRICO.....	22
2.1. Sistemas de alivio y venteo en plantas de tratamiento y procesamiento de hidrocarburos	22
2.2. Componentes de un sistema de Tea	23
2.3. Revisión de la norma API-521	26
2.4. Legislación y regulación vigente en Colombia.....	27
2.5. Requisitos y recomendaciones para sistemas de Tea.....	32
3. EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES GEOGRÁFICAS Y DE INFRAESTRUCTURA DEL CAMPO PETROLERO	35
3.1. Características geográficas del campo petrolero seleccionado	35
3.2. Evaluación de la infraestructura disponible para la instalación del sistema de Tea	38
3.2.1. Descripción general de la infraestructura existente	38
3.3. Identificación de criterios relevantes para la selección de la ubicación óptima del sistema de Tea.....	43
3.4. Estudio de casos de éxito y desafíos en la implementación de sistemas de tea en campos petroleros similares	48
3.4.1. Casos de éxito en la implementación de sistemas de Tea.....	48

3.4.2.	Desafíos en la Implementación de Sistemas de Tea	49
3.5.	Análisis comparativo y lecciones aprendidas	50
4.	CÁLCULOS DE DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE TEA	51
4.1.	Bases de diseño	51
4.1.2.	Naturaleza del gas a quemar	51
4.1.3.	Equipo y condiciones de alivio	55
4.2.	Cálculos conforme a los criterios establecidos en la norma API-521	55
4.2.1.	Cálculos de flujo de masa del gas	57
4.2.2.	Cálculo del calor de combustión	58
4.2.3.	Cálculo de la relación de calores específicos, $k = C_P/C_V$	61
4.2.4.	Cálculo del diámetro de la Tea:	62
4.3.	Consideración de la eficiencia de combustión y la eficiencia de destrucción y remoción de contaminantes	72
4.3.1.	Eficiencia de la tea	72
4.3.2.	Eficiencia de combustión (CE)	73
4.3.3.	Eficiencia de Destrucción y Remoción (DRE)	73
4.3.4.	Metodologías para Evaluar la Eficiencia de Combustión y DRE	75
4.3.5.	Cálculo teórico de eficiencia de combustión:	76
4.4.	Aplicación de metodologías de diseño óptimo y eficaz para el sistema de Tea.	78
4.4.1.	Metodología de Diseño de Ingeniería de Procesos (PDE)	79
4.4.2.	Metodología de diseño basada en el análisis de riesgos	80
4.4.3.	Metodología de diseño integrado	80
4.4.4.	Validación del diseño mediante software Flares	81

4.5. Análisis de sensibilidad de los cálculos ante diferentes escenarios operativos y condiciones ambientales	83
4.5.1. Metodología del análisis de sensibilidad	83
4.5.2. Resultados del análisis de sensibilidad	85
4.5.3. Discusión de los resultados obtenidos	86
4.5.4. Resultados de los cálculos realizados	87
5. ESTRATEGIAS Y TECNOLOGÍAS EMERGENTES PARA MITIGAR RIESGOS Y REDUCIR EMISIONES	88
5.1. Estrategias convencionales para mitigar riesgos asociados con la operación del sistema de tea	88
5.1.1. Descripción de las prácticas y procedimientos estándar utilizados para minimizar los riesgos operativos.	89
5.2. Tecnologías emergentes en el campo de la mitigación de emisiones contaminantes...	91
5.2.1. Sistema de monitoreo AGNI de Sensia Solutions	91
5.2.2. Otras tecnologías emergentes	92
5.3. Estrategias específicas para reducir emisiones y garantizar la sostenibilidad ambiental	93
5.3.1. Optimización del proceso de quema	93
5.3.2. Integración de energías renovables	93
5.3.3. Captura y almacenamiento de carbono (CCS).....	94
5.3.4. Uso de sistemas avanzados de combustión.....	94
5.3.5. Monitoreo y análisis de emisiones.....	94
5.4. Viabilidad económica y operativa de las tecnologías propuestas	95

5.4.1.	Evaluación de los costos de implementación.....	95
5.4.2.	Beneficios económicos	96
5.4.3.	Retorno de inversión (ROI)	97
5.4.4.	Viabilidad operativa.....	97
6.	IMPLEMENTACIÓN Y RECOMENDACIONES FINALES	99
6.1.	Planificación de la implementación del sistema de tea en el campo petrolero colombiano	
	99	
6.1.1.	Gestión del alcance	99
6.1.2.	Gestión del cronograma	100
6.1.3.	Gestión de costos	101
6.1.4.	Plan de capacitación.....	102
6.1.5.	Validación y pruebas.....	102
6.2.1.	Monitoreo continuo.....	103
6.2.2.	Mantenimiento preventivo	104
6.2.3.	Optimización del proceso de combustión	104
6.2.4.	Capacitación continua del personal	104
6.2.5.	Gestión de emisiones	105
6.2.6.	Revisión y actualización de protocolos de seguridad	105
6.3.1.	Riesgos financieros	106
6.3.2.	Retrasos en el cronograma	106
6.3.3.	Riesgos técnicos.....	106
6.3.4.	Riesgos de seguridad.....	107
6.3.5.	Riesgos ambientales.....	107

6.3.6. Obstáculos regulatorios.....	107
6.4.1. Conclusiones finales	¡Error! Marcador no definido.
6.4.2. Reflexiones sobre el impacto en el medio ambiente.....	109
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112

Lista de tablas

Tabla 1.	28
Tabla 2.	36
Tabla 3.	40
Tabla 4.	41
Tabla 5.	45
Tabla 6.	52
Tabla 7.	53
Tabla 8.	55
Tabla 9.	56
Tabla 10.	59
Tabla 11.	62
Tabla 12.	70
Tabla 13.	77
Tabla 14.	82
Tabla 15.	101

Lista de figuras

Figura 1. Estructuras de tea.....	24
Figura 2. Rosa de los vientos	37
Figura 3. Infraestructura existente sistema de tea.....	39
Figura 4. Fotografía aérea estación de tratamiento de hidrocarburos campo seleccionado	44
Figura 5. Envolvente de fases gas campo seleccionado	54
Figura 6. Imagen de la figura No 8, de la sección 6.4.2.3.3 de la norma API 521	65
Figura 7. Imagen de la figura No 9, de la sección 6.4.2.3.3 de la norma API-521.....	67
Figura 8. Imagen de la figura C.1 de la sección C.2.5 de la norma API-521 – Referencia de dimensiones de la Tea.....	71
Figura 9. Árbol de decisión para determinar CE y DRE	75

Lista de apéndices

Los apéndices están disponibles en el Repositorio Institucional.

Apéndice A. Resultados de simulación con software Flares

Apéndice B. Hoja de cálculo análisis de sensibilidad

Apéndice C. Diagrama de Gantt del proyecto de implementación del sistema de tea

Glosario

API (American Petroleum Institute): organización estadounidense que establece normas y estándares para la industria del petróleo y el gas, incluyendo la API 521 y API 537, que regulan los sistemas de alivio de presión y teas.

Captura y Almacenamiento de Carbono (CCS): tecnología que captura el dióxido de carbono (CO_2) emitido por actividades industriales y lo almacena en formaciones geológicas subterráneas para evitar su liberación a la atmósfera.

Combustión: proceso químico en el cual un material (combustible) reacciona con un oxidante (oxígeno) para liberar energía en forma de calor y luz, resultando en la producción de gases de escape.

Eficiencia de Combustión (CE): medida de la efectividad de un sistema de tea para oxidar completamente los hidrocarburos presentes en el gas natural, minimizando las emisiones de gases no quemados.

Flare (Tea): dispositivo utilizado en la industria petrolera para quemar gases residuales de manera controlada, reduciendo el riesgo de acumulación de gases inflamables y minimizando las emisiones de contaminantes.

Knockout Drum (KOD): equipo utilizado para separar los líquidos de los gases antes de que estos sean enviados a la tea, previniendo problemas en la combustión y mejorando la eficiencia del sistema.

Metano (CH_4): hidrocarburo simple y principal componente del gas natural, conocido por su alto poder calorífico y su contribución al efecto invernadero cuando se emite sin quemar.

Monitoreo en Tiempo Real: uso de tecnologías avanzadas, como sensores y sistemas de análisis de datos, para supervisar continuamente las condiciones operativas de un sistema de tea, permitiendo la detección temprana de anomalías y la optimización del rendimiento.

Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT): instrumento de planificación y gestión del desarrollo urbano y rural de un municipio, que establece normas y directrices para el uso del suelo y la ubicación de infraestructuras.

Project Management Institute (PMI): organización profesional que desarrolla estándares y guías para la gestión de proyectos, incluyendo el PMBOK Guide, que proporciona un marco de referencia para la planificación y ejecución de proyectos.

Retorno de Inversión (ROI): métrica financiera utilizada para evaluar la rentabilidad de una inversión, calculada como el cociente entre los beneficios netos obtenidos y el costo total de la inversión.

Sensor de Detección de Llama: dispositivo que monitorea la presencia de llama en un sistema de tea, proporcionando alertas en caso de falla de ignición para evitar la liberación de gases no quemados.

Sistema de Ignición: componente del sistema de tea encargado de encender el gas residual, asegurando una combustión continua y controlada.

Velocidad del Viento: parámetro meteorológico crucial para el diseño y operación de sistemas de tea, que influye en la dispersión de los gases quemados y la estabilidad de la llama.

Resumen

Título: Diseño de un sistema de tea para un campo petrolero colombiano de acuerdo con la norma estándar API-521¹

Autor: Miguel Antonio Plazas Muñoz²

Palabras clave: Sistema de tea, Combustión, Eficiencia, Emisiones, Normatividad

Descripción:

Esta monografía presenta un estudio exhaustivo sobre el diseño e implementación de un sistema de tea (flare) en un campo petrolero colombiano, con el objetivo de mejorar la eficiencia operativa y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Se seleccionó un campo específico ubicado en el departamento del Tolima, se analizaron sus características geográficas y de infraestructura.

El trabajo se divide en varios capítulos que abordan desde la evaluación de las condiciones iniciales hasta las recomendaciones finales para la gestión y operación del sistema de tea. Se realizó una revisión detallada de las normativas aplicables, incluyendo las normas API 521 y API 537, así como las regulaciones nacionales emitidas por el Ministerio de Minas y Energía de Colombia. Se llevaron a cabo cálculos de dimensionamiento siguiendo los criterios establecidos en estas normativas, y se analizaron la eficiencia de combustión y la eficiencia de destrucción y remoción de contaminantes.

¹ Trabajo de grado

² Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director Manuel Cabarcas Simancas.

Además, se exploraron estrategias y tecnologías emergentes para mitigar riesgos y reducir emisiones, considerando tanto las metodologías convencionales como las innovadoras. Se propuso un plan de gestión del proyecto basado en los lineamientos del Project Management Institute (PMI), incluyendo la planificación del cronograma, la gestión de costos, y la capacitación del personal.

El análisis de posibles riesgos y obstáculos en la implementación se complementó con sugerencias para su mitigación, asegurando una operación segura y eficiente del sistema de tea. Las conclusiones resaltan la importancia de un diseño bien planificado y la adopción de tecnologías avanzadas para lograr una operación sostenible y responsable con el medio ambiente.

Abstract

Title: Design of a Flare System for a Colombian Oil Field According to API-521 Standard

Author: Miguel Antonio Plazas Muñoz

Key words: Flare systems, Combustion, Efficiency, Emissions, Regulations

Description:

This monograph presents a comprehensive study on the design and implementation of a flare system in a Colombian oil field, aiming to improve operational efficiency and reduce greenhouse gas emissions. A specific field located in the Tolima department, was selected, and its geographical and infrastructural characteristics were analyzed.

The work is divided into several chapters addressing the initial conditions assessment to the final recommendations for the management and operation of the flare system. A detailed review of applicable regulations, including API 521 and API 537 standards, as well as national regulations issued by the Ministry of Mines and Energy of Colombia, was conducted. Sizing calculations were performed following the criteria established in these standards, and the combustion efficiency and destruction and removal efficiency of contaminants were analyzed.

Additionally, emerging strategies and technologies for mitigating risks and reducing emissions were explored, considering both conventional and innovative methodologies. A project management plan based on the guidelines of the Project Management Institute (PMI) was proposed, including schedule planning, cost management, and personnel training.

The analysis of potential risks and obstacles in implementation was complemented with mitigation suggestions, ensuring safe and efficient operation of the flare system. The final conclusions highlight the importance of a well-planned design and the adoption of advanced technologies to achieve sustainable and environmentally responsible operations.

Introducción

En el contexto de la industria energética global, los sistemas de tea se destacan como componentes esenciales en la gestión de la seguridad y el medio ambiente en los campos petroleros. En Colombia, la implementación de estos sistemas no solo es crucial por su función de seguridad al quemar gases residuales y prevenir sobrepresiones, sino también por su papel en la mitigación del impacto ambiental asociado con las operaciones petroleras. No obstante, la práctica actual enfrenta desafíos significativos debido a errores en el diseño, la falta de estandarización y el desconocimiento o la omisión de normativas internacionales como la API-521. Esto ha resultado en emisiones excesivas de contaminantes, ruidos y otros problemas operativos que comprometen tanto la seguridad como la sostenibilidad ambiental.

Este proyecto de monografía se propone diseñar un sistema de tea para un campo petrolero en Colombia, siguiendo rigurosamente la norma API-521. El enfoque será holístico, considerando no solo la ubicación y el dimensionamiento óptimos del sistema, sino también la integración de criterios de eficiencia de combustión y la eficiencia de destrucción y remoción de contaminantes. Esta investigación se justifica por la necesidad de adaptar los diseños de los sistemas de tea a los estándares internacionales, al mismo tiempo que se consideran las particularidades del entorno colombiano.

El alcance de este estudio incluirá una evaluación de la regulación vigente y la normativa API-521, el análisis de las características geográficas e infraestructurales del campo seleccionado y el desarrollo de estrategias para mitigar riesgos y reducir emisiones. Al finalizar, se espera que este proyecto no solo mejore las prácticas de diseño y operación de los sistemas de tea en Colombia, sino que también contribuya a la sostenibilidad ambiental, la seguridad operacional y

el bienestar de las comunidades cercanas a las operaciones petroleras. Con este compromiso, el trabajo pretende establecer un precedente en la industria, orientando hacia prácticas más seguras y responsables con el medio ambiente, y dejando un legado sostenible para el futuro energético de Colombia.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de Tea para un campo petrolero colombiano conforme a la normativa API-521, con especial énfasis en la integración de criterios de eficiencia de combustión y eficiencia de destrucción y remoción de contaminantes.

1.2. Objetivos específicos

Realizar un análisis exhaustivo de la regulación vigente y de la norma estándar API-521, centrándose en los requisitos y recomendaciones para los sistemas de Tea.

Establecer criterios vinculados a las características geográficas y de infraestructura existente en el campo petrolero colombiano seleccionado, con el fin de facilitar la identificación de la localización más adecuada para el sistema de TEA.

Realizar los cálculos de dimensionamiento del sistema de TEA, aplicando los criterios del estándar API-521 e incorporando las consideraciones específicas de Eficiencia de Combustión y Eficiencia de Destrucción y Remoción de Contaminantes, para garantizar un diseño óptimo y eficaz.

Proponer estrategias y tecnologías emergentes que permitan mitigar los riesgos asociados con la operación del sistema de TEA, reducir las emisiones contaminantes y garantizar la sostenibilidad ambiental.

2. Marco normativo y teórico

En el diseño y operación de sistemas de tea en la industria de hidrocarburos, es fundamental contar con un marco normativo y teórico sólido que guíe cada fase del proceso. Este marco asegura el cumplimiento de las regulaciones vigentes, optimiza la eficiencia operativa y minimiza los impactos ambientales. La normativa aplicable, como las resoluciones emitidas por el Ministerio de Minas y Energía y los lineamientos técnicos de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), establece los criterios y parámetros esenciales para el diseño, implementación y monitoreo de estos sistemas. Adicionalmente, los principios teóricos basados en estudios y metodologías reconocidas, proporcionan las bases científicas necesarias para abordar los desafíos técnicos asociados a la operación de los sistemas de tea. Este capítulo explora las regulaciones clave y las teorías subyacentes que sustentan el diseño y operación eficiente de los sistemas de tea, proporcionando un contexto integral para su aplicación en la industria petrolera.

2.1. Sistemas de alivio y venteo en plantas de tratamiento y procesamiento de hidrocarburos

Los sistemas de alivio y venteo, descritos en el estándar API-521, son esenciales para garantizar la operación segura en las plantas de tratamiento y procesamiento de hidrocarburos. En particular, los sistemas de tea, que permiten la eliminación del exceso de gas mediante su quema, son ampliamente considerados en este estándar. Estos sistemas no solo protegen los equipos de presiones excesivas, sino que también minimizan el impacto ambiental de las emisiones de gas no deseadas. En este contexto, la normativa API-521 se presenta como un estándar internacional que proporciona directrices sobre el diseño, la instalación y el mantenimiento de estos sistemas.

Desde un punto de vista técnico, la API-521 detalla exhaustivamente cómo deben diseñarse los sistemas de alivio para garantizar su funcionalidad y seguridad. Incluye especificaciones sobre la capacidad de manejo de carga, tipos de teas y consideraciones para situaciones de emergencia.

La eficiencia de los sistemas de quema se ha convertido en un punto focal tanto para la normativa API-521 como para las regulaciones colombianas. La API-521 aborda la eficiencia en términos de diseño óptimo y reducción de las emisiones durante las operaciones de emergencia y rutinarias. Por su parte, Colombia ha puesto un énfasis particular en la eficiencia de combustión y en la destrucción de los contaminantes, estableciendo requisitos de eficiencia de quema que deben ser verificados a través de mediciones regulares y reportes detallados. Estas medidas son vitales para asegurar que los sistemas no solo cumplan con su función de seguridad, sino que también contribuyan significativamente a la protección ambiental.

2.2. Componentes de un sistema de Tea

De acuerdo con las normas API-521 y API-537, los componentes principales de un sistema de tea incluyen:

- Punta de Tea (Flare Burner) o TIP

La punta de la Tea, también conocida como el TIP o quemador, es el punto donde se libera el gas para ser quemado. Debe ser diseñado para manejar el flujo máximo de gas esperado, resistir las condiciones ambientales y permitir una quema de gas de manera eficiente.

Existen dos estilos diferentes de puntas de Tea: de quemador sencillo (con una sola boquilla de salida) o de múltiples quemadores.

- Chimenea o estructura de Tea (Flare stack)

La chimenea de tea es una estructura elevada que dispersa los gases quemados a una altura segura, minimizando el impacto ambiental y la exposición del personal a gases tóxicos.

Según el estándar API-521, hay gran variedad de estructuras de teas, que se pueden clasificar según sea si la Tea es elevada u horizontal.

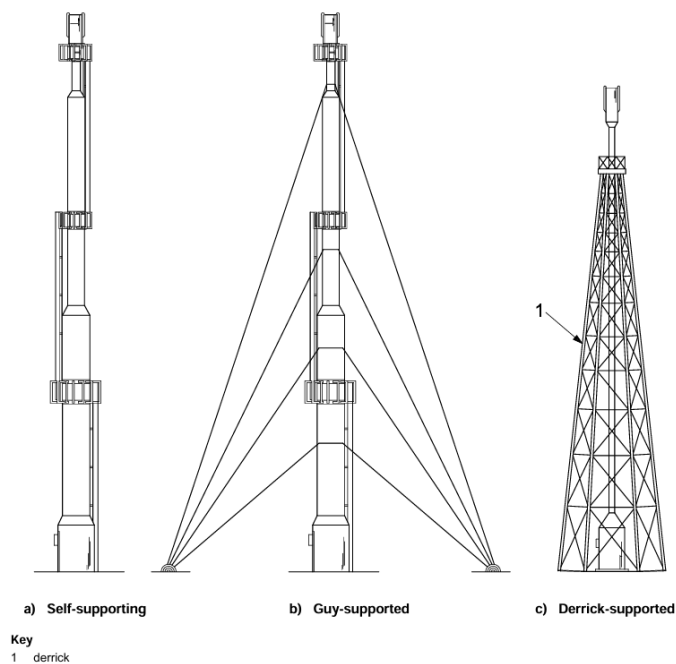
Las teas elevadas pueden tener las siguientes configuraciones:

- Auto soportada (Self-supporting)
- Soportada por guayas y tensores (Guy-supported)
- Soportada por torre (Derrick-supported)

En la figura 1 muestra una representación de cada una de estas configuraciones.

Figura 1

Estructuras de tea



Nota. La imagen representa los diferentes tipos de estructuras para una Tea. Tomada de: ANSI/API standard 521 Fifth Edition (p.100), January 2007.

- Piloto de encendido

El piloto de encendido es un componente crítico que garantiza la ignición del gas en la punta de la Tea. Debe ser confiable y capaz de operar en diversas condiciones climáticas para asegurar una ignición continua.

- Sistema de ignición

El sistema de ignición, que incluye el piloto de encendido, debe ser seguro y confiable. Puede ser de tipo eléctrico, de gas o una combinación de ambos, y debe estar diseñado para encender el gas en la punta de la Tea de manera efectiva.

- Dispositivos de detección de llama

Estos dispositivos monitorean la presencia de llama en la punta de la Tea. Son cruciales para detectar fallos en la ignición y activar sistemas de respaldo o alarmas si es necesario.

- Tuberías y válvulas

Las tuberías y válvulas transportan el gas desde la planta de tratamiento o procesamiento hasta el punto de conexión o entrada de la Tea. Deben estar diseñadas para manejar altas presiones y temperaturas, y ser resistentes a la corrosión.

- Knockout Drum (KOD)

El KOD es un separador que elimina líquidos del gas antes de que llegue a la punta de la Tea o TIP. Esto previene que los líquidos entren en el sistema de Tea, lo que podría causar problemas de combustión o dañar el equipo.

- Sistema de supervisión y control

Este sistema monitorea y controla la operación de la Tea. Incluye sensores de presión y temperatura, sistemas de alarma e interfaces de operador (HMI). Es fundamental para la operación segura y eficiente del sistema.

- Área estéril

El área estéril es una zona alrededor de la Tea que debe estar libre de personal y equipo no esencial. Está demarcada para prevenir el acceso no autorizado y garantizar la seguridad en caso de una emergencia.

Existen otros componentes del sistema de Tea que pueden ser necesarios según la criticidad y las necesidades específicas de la operación. Estos elementos adicionales incluyen sistemas de supresión de humo, sellos líquidos, sellos de velocidad, escudos de protección contra viento, lluvia y radiación, arrestadores de llama o de detonaciones, blowers, medidores de flujo de gas, escaleras, plataformas y luces de advertencia para aeronaves.

2.3. Revisión de la norma API-521

El estándar API – 521, emitido por el American Petroleum Institute (API), proporciona directrices para el diseño y operación de sistemas de alivio de presión en la industria petrolera y gasífera. Este estándar se enfoca en métodos para determinar los escenarios de alivio, evaluar la capacidad de alivio, selección de dispositivos y más. Según lo expuesto por Maarooof, Smith, J. D., & Zangana, M. H. S. (2023), el diseño de una Tea utilizando la ecuación y el método proporcionados por el estándar API-521 permite determinar la altura y el diámetro de la Tea³, siendo estas dos variables fundamentales para alcanzar niveles óptimos de eficiencia y seguridad durante el proceso de quema de gas.

El diseño y operación segura de las Teas en la industria petrolera están profundamente arraigados en estándares técnico-regulatorios de renombre mundial. Los estándares API-521 y

³ Maarooof, Smith, J. D., & Zangana, M. H. S. (2023). Design and simulation of a utility oilfield flare in Iraq/Kurdistan region using CFD and API-521 methodology. *Heliyon*, 9(8), e18581–e18581. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18581>

API-537, emitidos por el American Petroleum Institute (API), representan dos pilares fundamentales en este contexto. El API-521 proporciona directrices detalladas sobre sistemas de alivio de presión y despresurización, abordando aspectos clave para garantizar que los sistemas de Tea operen de manera eficiente y segura, especialmente durante situaciones de emergencia. Por otro lado, el API-537 se centra en los detalles específicos de las Teas en la industria petroquímica, aportando especificaciones técnicas y mejores prácticas en el diseño y funcionamiento de estas instalaciones. Juntos, estos estándares aseguran que las Teas no solo cumplan con los requerimientos de seguridad, sino que también sean eficientes, respetuosas con el medio ambiente y en consonancia con las expectativas de la industria a nivel global. Su adhesión no solo refleja un compromiso con la excelencia técnica, sino también con la responsabilidad social y medioambiental.

2.4. Legislación y regulación vigente en Colombia

La correcta gestión y control de las emisiones de gas a la atmósfera es una prioridad global, teniendo en cuenta el impacto ambiental y las consecuencias en la salud pública. Para los sistemas de Tea, que son dispositivos críticos en este aspecto, es esencial el cumplimiento no solo de estándares internacionales, sino también de normativas nacionales que aseguren su correcto funcionamiento y operación.

En Colombia, la normatividad vigente que regula el diseño y operación de estos sistemas está claramente delineada. Se puede observar una combinación de decretos y resoluciones emitidos por diferentes ministerios, lo que subraya la importancia interdisciplinaria del tema.

A continuación, se presenta un resumen de los decretos y resoluciones más relevantes:

Tabla 1.*Resumen normatividad vigente en Colombia*

NORMA	NOMBRE	APLICABLE A TEAS
Decreto	Decreto No. 2 de 1982 Ministerio de Salud: Por el cual se reglamentan parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979 y el Decreto Ley 2811 de 1974, en cuanto a emisiones atmosféricas.	Artículo 40. Altura mínima de descarga: Los puntos de descarga de contaminantes al aire ambiente no podrán estar localizados a una altura inferior a quince (15) metros desde el suelo, o a la señalada como MÍNIMA en cada caso, según las normas establecidas en el presente Decreto. De acuerdo con la interpretación, una tea puede ser considerada como un punto de descarga de contaminantes al aire. Por lo tanto, el artículo 40 establece que la altura mínima de una tea debe ser de, al menos, 15 metros.
Resolución	Resolución No. 909 de 2008 Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: Por la	Tras revisar la resolución, se puede concluir que no es aplicable al diseño y fabricación de teas para la

	<p>cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones.</p>	<p>quema de gas en la industria Oil&Gas colombiana. No obstante, establece límites de emisiones para la industria en general que tenga puntos de descarga de contaminantes a la atmósfera. Las emisiones admisibles de Hidrocarburos Totales (HCT) son de 50 [mg/m³]</p>
<p>Resolución</p>	<p>Resolución No. 181495 de 2009 Ministerio de Minas y Energía: Por la cual se establecen medidas en materia de exploración y explotación de hidrocarburos.</p>	<p>Artículo 52: Prohibición de quema de gas y desperdicio. Aunque esta resolución no aborda el diseño de las teas, prohíbe tajantemente la quema de gas. No obstante, se permite bajo ciertas condiciones.</p>
<p>Resolución</p>	<p>Resolución 40066 de 2022 Ministerio de Minas y Energía: Por la cual se establecen requerimientos técnicos para la detección y reparación de fugas, el aprovechamiento, quema y</p>	<p>Artículo 22: Sobre la eficiencia de la tea. Esta resolución incluye una serie de requisitos destinados a garantizar la eficiencia de la Tea. Sin embargo, la resolución presenta</p>

	<p>venteo de gas natural durante las actividades de exploración de hidrocarburos.</p>	<p>algunos vacíos que debieron ser aclarados en una resolución posterior.</p>
Resolución	<p>Resolución 40317 de 2023 Ministerio de Minas y Energía: Por la cual se modifica la resolución 40066 de 11 de febrero de 2022, mediante la cual se establecen requerimientos técnicos para la detección y reparación de fugas, el aprovechamiento, quema y venteo de gas natural durante las actividades de exploración y explotación de hidrocarburos.</p>	<p>Artículo 3: Modifica el artículo 22 de la Resolución 40066 de 2022.</p> <p>Este artículo define de manera más clara el proceder de las compañías operadoras ante los reportes de las inspecciones necesarias para establecer la eficiencia de la Tea. Además, asigna a la entidad de fiscalización (ANH) la responsabilidad de establecer los lineamientos técnicos para la evaluación de la eficiencia de la tea y para la presentación del informe de resultados.</p>
Lineamientos	<p>Lineamientos técnicos para la evaluación de eficiencia de tea para quema de gas natural en producción.</p>	<p>Determina los lineamientos técnicos que deben seguir las compañías operadoras encargadas de la exploración y explotación de</p>

hidrocarburos, para evaluar el rango mínimo de eficiencia de las teas y para la presentación del informe de resultados del proceso de medición de eficiencia de las teas en producción, según lo establecido en el artículo 3 de la Resolución 40317 de 2023, que modificó el artículo 22 de la Resolución 40066 de 2022 del Ministerio de Minas y Energía.

Estándar	API-521 Pressure-relieving and Depressuring Systems.	El estándar API 521 especifica requisitos y proporciona pautas para examinar las principales causas de sobrepresión, determinar las tasas de alivio individuales y seleccionar y diseñar sistemas de eliminación. Estos sistemas incluyen componentes como tuberías, recipientes, Teas y chimeneas de ventilación.
----------	--	--

Estándar	API-537 Flare Details for General Refinery and Petrochemical Service.	El estándar API 537 especifica los requisitos y proporciona orientación para la selección, diseño,
----------	---	--

especificación, operación y mantenimiento de las teas y sus componentes mecánicos y de combustión relacionados.

Cada una de estas normativas y estándares aporta una capa adicional de directrices y parámetros a seguir, garantizando que los sistemas de Tea operen de manera segura, eficiente y ambientalmente responsable.

2.5. Requisitos y recomendaciones para sistemas de Tea

Para asegurar el correcto funcionamiento y el cumplimiento normativo de los sistemas de Tea, es fundamental considerar los requisitos y recomendaciones establecidos por las normas API 521 y API 537, así como la regulación nacional vigente.

La selección del cabezal de Tea o TIP debe ser adecuada para manejar el flujo máximo de gas proyectado y estar fabricado con materiales resistentes a altas temperaturas y condiciones climáticas adversas. El piloto de encendido y el sistema de ignición deben ser confiables para asegurar la ignición continua del gas. Se recomiendan sistemas eléctricos o de gas, o una combinación de ambos, para mayor seguridad.

Los dispositivos de detección de llama deben ser capaces de detectar la presencia o ausencia de llama en tiempo real y conectarse a sistemas de alarma para alertar al personal en caso de fallo de ignición. Las tuberías y válvulas del sistema de Tea deben estar diseñadas para soportar las condiciones de operación, incluyendo presión y temperatura, y deben estar hechas de materiales resistentes a la corrosión para prolongar la vida útil del sistema.

El Knockout Drum (KOD) debe ser eficaz en la eliminación de líquidos del gas para prevenir problemas en la combustión y facilitar el acceso para inspección y limpieza periódica. El sistema de supervisión y control debe incluir sensores de presión y temperatura para monitorear las condiciones del sistema, y una interfaz amigable para el monitoreo y control del sistema.

Es crucial definir y señalar claramente la zona de seguridad alrededor del sistema de Tea, limitando el acceso a personal autorizado solamente. La chimenea o cuerpo de Tea debe estar diseñada para dispersar los gases quemados a una altura segura y asegurar que la estructura sea robusta y estable bajo condiciones extremas.

El sistema de Tea debe estar diseñado para operar eficientemente en diversas condiciones climáticas, incluyendo vientos fuertes, lluvia y temperaturas extremas. Se debe considerar la protección de componentes críticos contra condiciones adversas.

Es esencial establecer un programa de mantenimiento regular para inspección y limpieza de todos los componentes del sistema, y capacitar al personal en procedimientos operativos y de emergencia específicos para el sistema de tea. El diseño y la operación del sistema deben cumplir con todas las regulaciones nacionales y las normas API-521 y API-537, implementando sistemas para monitorear y minimizar el impacto ambiental de las emisiones del tea.

La mejora continua es vital para mantener la seguridad y eficiencia operativa. Es importante mantenerse al día con las últimas tecnologías y prácticas en el diseño y operación de sistemas de tea, realizando evaluaciones periódicas del sistema para identificar áreas de mejora y actualizar componentes según sea necesario.

El diseño y la operación de un sistema de tea eficiente y seguro requieren una consideración cuidadosa de múltiples factores, siguiendo los requisitos y recomendaciones de las normas API 521 y API 537. La implementación de estos estándares asegura la quema controlada de gases de

hidrocarburos, minimizando los riesgos para el personal y el medio ambiente. Un enfoque proactivo en el mantenimiento y la innovación tecnológica es clave para mantener la seguridad y eficiencia operativa a largo plazo.

3. Evaluación de las condiciones geográficas y de infraestructura del campo petrolero

El análisis de las condiciones geográficas y de infraestructura del campo petrolero es un componente esencial en el diseño y operación de sistemas de tea. Las características geográficas, como la topografía, el clima y la proximidad a áreas pobladas, influyen significativamente en la planificación y ubicación de estos sistemas. Además, la infraestructura existente, incluyendo la red de tuberías, los equipos de procesamiento y las instalaciones de almacenamiento, determina la viabilidad y eficiencia del sistema de tea. Este capítulo aborda la evaluación detallada de estos aspectos, proporcionando una comprensión integral de los factores que afectan la implementación y el rendimiento de los sistemas de tea en campos petroleros específicos.

3.1. Características geográficas del campo petrolero seleccionado

Para el desarrollo de esta monografía, con un alcance exclusivamente académico, se seleccionó un campo de producción petrolera ubicado en el municipio de Chaparral, departamento del Tolima. Esta región forma parte de la cuenca del Valle Alto del Magdalena y presenta características geográficas y ambientales específicas que serán analizadas detalladamente.

Tabla 2.*Condiciones ambientales del campo petrolero seleccionado*

VARIABLE	DATO	UNIDAD
Altitud	854	m.s.n.m
Temperatura Ambiente	80	[°F]
Humedad Relativa Promedio	85	%
Vientos		
Dirección	Sur Oriente Geográfico	
Predominante		
Velocidad	11	[ft/s]
Predominante		
Radiación Solar⁴	283	BTU/h ft ²

Nota. Información tomada de la página web:

(https://www.meteoblue.com/es/tiempo/archive/windrose/chaparral_colombia)

La figura 2 muestra la rosa de los vientos del campo petrolero seleccionado, la cual ilustra la frecuencia y la velocidad predominante de los vientos en la región. Esta herramienta gráfica es esencial para comprender las condiciones meteorológicas del área y proporciona información crítica para el diseño y la operación segura de las instalaciones petroleras. La rosa de los vientos muestra la distribución de las direcciones y las velocidades del viento, facilitando así la planificación y la mitigación de posibles riesgos asociados con las condiciones atmosféricas.

⁴ Valor recomendado API STD 521, página 105.

Figura 2.

Rosa de los vientos.



Nota. La imagen fue tomada de la página web:

https://www.meteoblue.com/es/tiempo/archive/windrose/chaparral_colombia

3.2. Evaluación de la infraestructura disponible para la instalación del sistema de Tea

Se llevó a cabo un análisis detallado de la infraestructura existente en el campo petrolero seleccionado para determinar su capacidad y adecuación para la instalación del sistema de tea. Es importante mencionar que, aunque el campo ya cuenta con un sistema de tea, este carece de información técnica suficiente y de memorias de cálculo, disponiendo únicamente de una placa antigua con información limitada. Además, el sistema no posee componentes básicos, como un sistema de ignición, y presenta emisiones de humo y hollín, lo que afecta directamente la eficiencia del equipo. Para simplificar la evaluación, esta se enfoca exclusivamente en la infraestructura relacionada con el manejo de gas hacia la tea, omitiendo información sobre equipos y facilidades de producción y tratamiento de crudo.

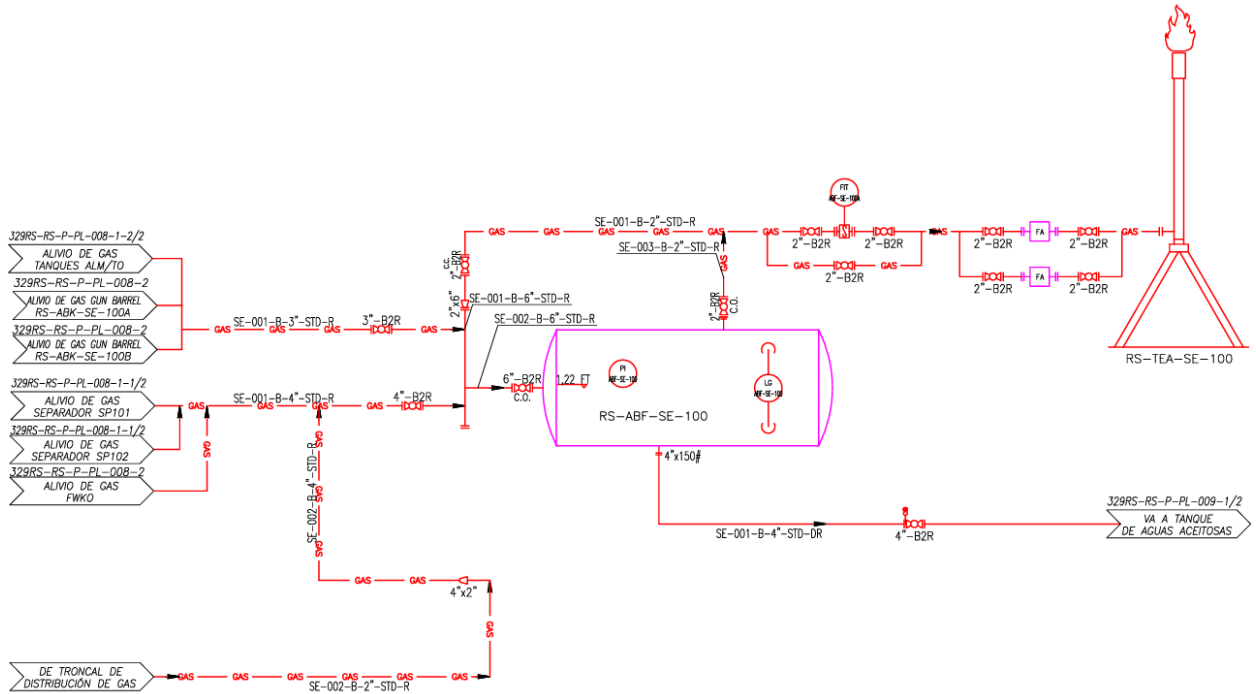
3.2.1. Descripción general de la infraestructura existente

Actualmente, el campo petrolero tiene una producción de gas de 1 [MMscfd] proveniente del sistema de gas de anulares de los pozos productores. Si bien esta cantidad de gas es modesta, es suficiente para satisfacer la demanda de gas para la generación de energía eléctrica utilizada como autoconsumo del mismo campo. Los excedentes, además de los alivios de alta y baja presión de la estación de producción, se direccionan hacia la tea existente.

A continuación, la figura 3 describe la infraestructura existente:

Figura 3.

Infraestructura existente sistema de tea



Nota. Imagen tomada de un diagrama de instrumentación y procesos P&ID

El gas que llega al sistema de tea existente proviene de dos fuentes. La primera es la línea troncal de distribución de gas, una tubería de 2 pulgadas que transporta los excedentes de gas del proceso de generación de energía (Gas to Power). La segunda fuente es un cabezal que reúne las líneas de disparo o alivio de los equipos de producción, como tanques de almacenamiento, Gun Barrel y separadores.

El gas que va hacia la tea pasa primero por un Knockout Drum (KOD), el cual está equipado con un indicador de presión tipo manómetro y un visor de nivel de condensado. Una vez que el gas sale del KOD, pasa a través de un medidor de flujo de gas ultrasónico y posteriormente

entra en la tea existente, construida en tubería de 2 pulgadas de diámetro, elevada, soportada por guayas, con una altura de 43 pies.

3.2.1.1. Análisis de la Capacidad de las Instalaciones. A continuación, se presentan 2 tablas con la información obtenida en campo sobre la capacidad de las instalaciones existentes.

Knockout Drum (KOD):

Tabla 3.

Información KOD existente en campo

NOMBRE DEL EQUIPO		KOD
Identificación		RS-ABF-SE-100
Capacidad	[MMSCFD]	1,3
Presión operación	[psig]	35
Temperatura Operación/Diseño	[°F]	86 / 100
Presión gas combustible	[psig]	30
Dimensiones		Ø 2,45 ft x L: 5,4 ft

Nota. Información tomada de levantamiento de información en campo

Tea existente:

Tabla 4.

Información placa tea existente

NOMBRE DEL EQUIPO		TEA
Identificación		RS-TEA-SE-100
Capacidad	[MMscfd]	0,5
Presión operación	[psig]	15
Temperatura Operación/Diseño	[°F]	300
Dimensiones		Ø 2" x L: 43 [ft]

Nota. Información obtenida por levantamiento en campo.

El análisis de la infraestructura existente revela que la capacidad de manejo de gas del Knockout Drum (KOD) es de 1,3 [MMscfd], mientras que la capacidad de la tea es de 0,5 [MMscfd]. La producción actual de gas del campo es de 1 [MMscfd], lo que significa que la tea existente no es capaz de manejar todo el gas producido, ya que su capacidad es insuficiente en comparación con la producción total. Por otro lado, la tea tiene una altura de 43 [ft], lo cual es inferior a la altura mínima de 49,2 [ft⁵] (15 metros) exigida por la regulación colombiana para puntos de emisiones fijas. Esta discrepancia indica que la tea existente no cumple con las normativas nacionales y necesita ser modificada para aumentar su altura y su capacidad de manejo de gas, con el fin de cumplir los requisitos regulatorios y mejorar su eficiencia operativa.

⁵ Decreto No. 2 de 1982 Ministerio de Salud

3.2.1.2. *Evaluación de los Sistemas de Seguridad y Control.* La infraestructura existente del sistema de tea no cuenta con piloto de encendido ni con un sistema de ignición que garantice un encendido confiable y seguro. Además, carece de dispositivos de detección de llama que puedan servir como indicación o alarma en caso de ausencia de llama cuando la tea se apague. Esta situación es grave en términos ambientales, ya que podría provocar emisiones directas de gas a la atmósfera debido a la falta de combustión. No se evidencia un área estéril definida o demarcada, por lo que el acceso a la zona de la tea no está restringido, exponiendo a las personas de la operación a la radiación sin que se den cuenta.

La ubicación del sistema de tea existente en el campo presenta un aspecto positivo al encontrarse alejada de zonas habitadas y predios de terceros, lo cual minimiza los riesgos para la población y las propiedades cercanas. Sin embargo, el KOD no está conectado a un sistema de supervisión y control electrónico, lo que lo hace depender de las rondas del operador para detectar posibles sobrepresiones o aumentos inesperados en el nivel de condensados. Esta situación podría causar arrastre de líquidos a la tea, incrementando los riesgos operativos.

La identificación de estos hallazgos presenta una serie de oportunidades de mejora que se pueden abordar con la implementación de un nuevo sistema de tea diseñado conforme a estándares internacionales, como las normas API 521 y API 537, además de cumplir con la regulación nacional vigente.

3.3. Identificación de criterios relevantes para la selección de la ubicación óptima del sistema de Tea.

La correcta selección de la ubicación de un sistema de tea es fundamental para garantizar la seguridad, eficiencia y cumplimiento normativo de las instalaciones industriales. Un sistema de Tea debe estar estratégicamente ubicado para minimizar riesgos y maximizar la eficiencia operativa.

La seguridad es el primer criterio por considerar al seleccionar la ubicación de un sistema de tea. Es crucial mantener una distancia segura de áreas habitadas para minimizar el riesgo para las personas. Además, se deben evaluar los radios de seguridad relacionados con la radiación térmica, asegurando que solo el personal autorizado tenga acceso al área inmediata del sistema de tea.

Las condiciones meteorológicas también juegan un papel vital en la selección de la ubicación. Es esencial considerar la dirección y velocidad predominante del viento para garantizar una dispersión adecuada de los gases quemados.

Los factores topográficos, como la elevación del terreno y la proximidad a cuerpos de agua, son igualmente importantes. La ubicación debe permitir una buena dispersión de gases y ser accesible, evitando la contaminación de cuerpos de agua cercanos.

La accesibilidad y el mantenimiento son otros aspectos críticos. La ubicación debe proporcionar rutas de acceso adecuadas para vehículos y equipos de mantenimiento, así como espacio suficiente para realizar operaciones de mantenimiento y responder a emergencias de manera eficiente.

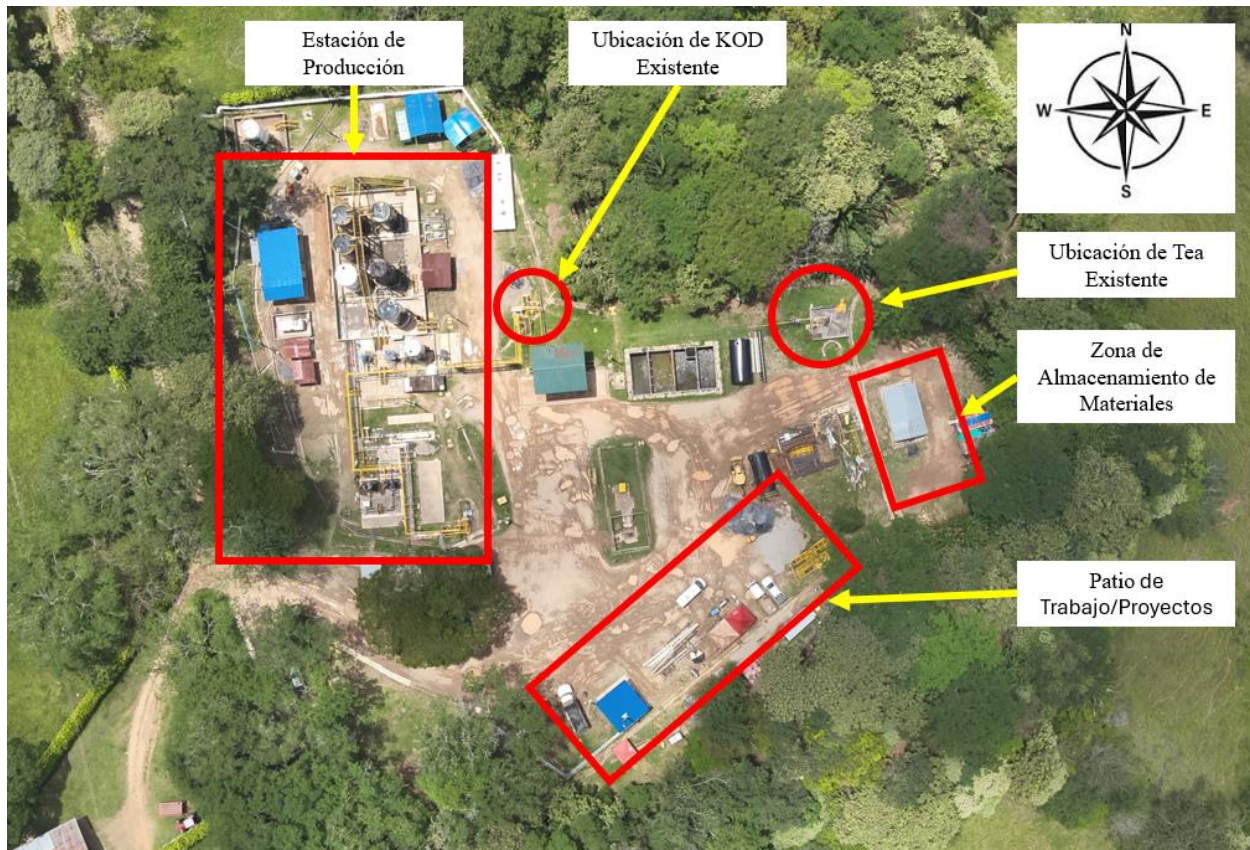
El impacto ambiental también debe ser considerado, minimizando la afectación a la flora y fauna local y evitando áreas protegidas o sensibles.

Finalmente, la infraestructura existente debe ser evaluada para asegurar la disponibilidad de conexiones a sistemas de gas y electricidad, así como la integración con otros sistemas de seguridad y monitoreo de la planta.

Como parte del análisis, se presentan los resultados obtenidos tras evaluar cada uno de los criterios identificados anteriormente, tomando como referencia la distribución de área actual de la estación de producción del campo, mostrada en la figura 4.

Figura 4.

Fotografía aérea estación de tratamiento de hidrocarburos campo seleccionado



Un resumen de los resultados del análisis se presenta en la tabla 5.

Tabla 5.

Análisis criterios de ubicación de Tea existente

CRITERIOS		UBICACIÓN TEA EXISTENTE	ASPECTO
Seguridad	Áreas habitadas	No existen zonas habitadas en las inmediaciones de la Tea existente.	Positivo
	Radio de seguridad por radiación térmica	No está definido ni demarcado el radio de seguridad o área estéril de la Tea existente.	Negativo
	Acceso de personal No autorizado a zona de Tea	El acceso es libre a cualquier persona que se encuentre dentro de la estación, no hay restricciones.	Negativo
Condiciones meteorológicas	Dirección y velocidad predominante del viento	La dirección predominante del viento es hacia el sur oriente geográfico, haciendo que la inclinación de la llama y la dispersión de los gases vaya en dirección hacia la zona de almacenamiento de materiales.	Negativo
Factores topográficos	Elevación del terreno	La Tea existente se encuentra sobre un terreno plano de fácil acceso para el personal autorizado.	Positivo

	Cuerpos de agua adyacentes	No hay presencia de cuerpos de agua cercanos a la ubicación actual de la Tea.	Positivo
Accesibilidad	Rutas de acceso adecuadas para vehículos	El acceso al sitio de la Tea existente es adecuado para vehículos de todo tipo.	Positivo
	Acceso adecuado para personal de mtto.	El acceso al sitio de la Tea existente es adecuado para el personal de mantenimiento y emergencias.	Positivo
Impacto ambiental	Afectación a la fauna y flora local	La zona inmediatamente al norte de la ubicación actual de la Tea del campo limita con una zona boscosa, sin embargo, No se evidencian afectaciones a la flora producto de la radiación térmica. Tampoco se evidencian afectaciones a la fauna. Es importante destacar que toda distribución de área actual y ubicación de equipos se encuentra dentro del marco legal y ambiental colombiano.	Positivo

		La ubicación del campo y de la Tea no se encuentra dentro de un área protegida.	Positivo
	Áreas protegidas		
	Facilidades eléctricas y de gas	La ubicación actual cuenta con facilidades de conexión eléctricas y de gas combustible.	Positivo
Infraestructura existente	combustible		
	Knock out Drum (KOD)	Existe un KOD para la Tea en el campo con capacidad de manejo del volumen de gas actual.	Positivo

A manera de conclusión, se puede decir que la ubicación actual de la tea existente es adecuada; no obstante, se pueden mejorar aspectos de seguridad como la demarcación de la zona estéril para garantizar un radio de seguridad que evite la exposición a la radiación térmica. Además, se recomienda implementar una barrera de restricción de acceso que permita únicamente el ingreso del personal autorizado para actividades de operación, mantenimiento y atención de emergencias.

Otra oportunidad de mejora identificada está relacionada con las condiciones meteorológicas. Debido a la dirección predominante del viento en la zona, la llama y la dispersión de los gases producto de la combustión se dirigen hacia el área de almacenamiento de materiales. Por lo tanto, se recomienda reubicar esta zona para asegurar que más allá de la tea no haya otras ubicaciones que involucren la presencia permanente o transitoria de personas ajenas a la operación y mantenimiento de la tea.

3.4. Estudio de casos de éxito y desafíos en la implementación de sistemas de tea en campos petroleros similares

Para abordar esta fase, se define como campo similar aquel campo petrolero colombiano que tenga una producción de gas comparable y que además el volumen de gas que se envía a la tea sea similar. Esta limitación asegura que las condiciones operativas y los desafíos enfrentados sean comparables. Se seleccionaron cuatro campos petroleros en la región que cumplen con este criterio, todos los cuales han implementado sistemas de tea en diversas fases de desarrollo y operación.

Con el fin de respetar las políticas de confidencialidad y reserva de la información, se omiten los nombres y las ubicaciones exactas de los campos petroleros seleccionados para este análisis. Debido a que la finalidad de este proyecto es netamente académica, los nombres asignados a cada campo son A, B, C y D.

3.4.1. Casos de éxito en la implementación de sistemas de Tea

Campo A: Este campo, ubicado en la región norte, ha implementado un sistema de tea soportado por guayas y tensores, diseñado conforme a las normas API-521 y API-537. La instalación incluyó un piloto de encendido confiable, compuesto por un sistema de ignición eléctrico tipo chispa de alto voltaje, un sistema de detección de llama integrado por dos sensores de temperatura tipo termocuplas (sistema redundante), y un KOD eficiente con la capacidad suficiente para contener los condensados producto de la expansión del gas proveniente de las diversas líneas de alivio de presión. Como resultado, se observó una mejora significativa en la seguridad operativa y una notable reducción en las emisiones de gases no quemados.

Campo B: Situado en la región sur, este campo adoptó un enfoque innovador utilizando tecnologías emergentes en el diseño de su sistema de tea. La implementación de un sistema de

monitoreo en tiempo real, compuesto por un detector de llama óptico, y la integración de tecnologías de ignición avanzada, como el sistema FFG (Flame Front Generator), resultaron en un aumento de la eficiencia de combustión y un cumplimiento normativo más estricto. Este enfoque fue reconocido por las autoridades ambientales.

3.4.2. Desafíos en la Implementación de Sistemas de Tea

Campo C: Este campo enfrentó desafíos significativos debido a la falta de consideración del crecimiento y la expansión del casco urbano del municipio. No se tuvo en cuenta el Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT), lo que resultó en que la zona urbana se acercara a la ubicación existente de la tea presentando muchos inconvenientes con la comunidad. Los residentes se vieron afectados por la radiación térmica y lumínica de la tea, además del ruido que producía y las emanaciones de olores debido a los gases que no se quemaban en su totalidad. Estos problemas generaron una creciente insatisfacción entre los habitantes, destacando la necesidad de revisar y ajustar la ubicación del sistema de tea para minimizar su impacto en la comunidad. Hoy en día, esta situación ya fue resuelta con la reubicación del sistema de tea.

Campo D: En este campo, los desafíos surgieron debido a un diseño que no consideró adecuadamente la composición del gas a quemar, que tenía un alto contenido de CO₂, dificultando su ignición. El error principal fue no garantizar que el piloto del sistema de ignición contara con una fuente alternativa de gas combustible para mantenerse encendido y poder realizar una reignición efectiva de la tea cada vez que se apagara. La ausencia de un piloto encendido, combinada con el alto contenido de CO₂ en el gas natural, resultó en la falta de llama en la tea y en altas emisiones de gases a la atmósfera. Las medidas correctivas incluyeron la adición de una fuente alternativa de gas combustible para el piloto y la implementación de un sistema de monitoreo más sofisticado, mejorando significativamente la seguridad y el desempeño del sistema.

3.5. Análisis comparativo y lecciones aprendidas

El análisis de los casos de éxito y desafíos en la implementación de sistemas de tea en campos petroleros similares revela varios factores críticos que determinan el éxito de estos proyectos. Los campos A y B demostraron que una planificación meticulosa y la adopción de tecnologías avanzadas, como sistemas de ignición confiables y monitoreo en tiempo real, pueden llevar a mejoras significativas en la seguridad operativa y la eficiencia de combustión, así como a un cumplimiento normativo más estricto. Estos casos destacan la importancia de considerar las especificaciones técnicas y normativas desde el inicio del diseño.

En contraste, los desafíos enfrentados por los campos C y D subrayan la necesidad de una evaluación integral de factores externos y del diseño técnico. El campo C mostró que no tener en cuenta el crecimiento urbano y las regulaciones de ordenamiento territorial puede resultar en graves inconvenientes comunitarios y operativos. La resolución de estos problemas mediante la reubicación de la tea destaca la importancia de la planificación a largo plazo y la flexibilidad para adaptarse a cambios en el entorno. Por otro lado, el campo D evidenció que la composición del gas a quemar y la falta de fuentes alternativas de gas combustible para el piloto pueden afectar significativamente la operación del sistema. Las medidas correctivas implementadas resaltan la necesidad de un diseño robusto que considere todas las variables operativas.

Las lecciones aprendidas de estos casos incluyen la importancia de una planificación detallada, la consideración de factores externos como el crecimiento urbano, la adopción de tecnologías avanzadas y la flexibilidad para adaptarse a cambios y resolver problemas imprevistos. Implementar estas prácticas puede conducir a una operación más segura, eficiente y sostenible de los sistemas de Tea en los campos petroleros del país.

4. Cálculos de dimensionamiento del sistema de tea

En el diseño y operación de sistemas de tea, los cálculos de dimensionamiento son fundamentales para asegurar su eficiencia y cumplimiento normativo. Este capítulo aborda el proceso de dimensionamiento del sistema de tea, incluyendo el cálculo de parámetros críticos como la altura, el diámetro y la capacidad de manejo de gas. Basados en las normas internacionales API 521 y API 537, así como en la regulación nacional vigente, estos cálculos permiten diseñar un sistema de tea que optimice la combustión de gases, minimice las emisiones y garantice la seguridad operativa. A través de un enfoque metodológico riguroso y detallado, se presentan los pasos y fórmulas necesarias para dimensionar adecuadamente el sistema de tea, proporcionando una base sólida para su implementación y operación eficiente en el campo petrolero.

4.1. Bases de diseño

Las bases de diseño son fundamentales para el desarrollo de un sistema de tea eficiente y seguro. Estas bases establecen los parámetros y criterios iniciales que guiarán todos los cálculos y decisiones de diseño posteriores. Este apartado detalla los aspectos clave que deben considerarse al definir las bases de diseño, incluyendo la naturaleza del gas a quemar, las condiciones operativas del campo petrolero, y las especificaciones normativas según la norma API-521.

4.1.2. Naturaleza del gas a quemar

La naturaleza del gas a quemar es un factor crucial en el diseño y operación de un sistema de tea. Este apartado analiza las características específicas del gas natural producido en el campo petrolero, incluyendo su composición química, poder calorífico y propiedades físicas. Comprender estas características es esencial para dimensionar adecuadamente el sistema de tea y asegurar una

combustión eficiente y segura, minimizando las emisiones contaminantes y optimizando el desempeño del equipo.

Tabla 6.

Cromatografía de gas⁶

COMPUESTO	FÓRMULA QUÍMICA	% MOLAR	% PESO
Dióxido de Carbono	CO ₂	8,19	17,17
Nitrógeno	N ₂	0,22	0,29
Metano	C ₁	83,54	63,81
Etano	C ₂	2,03	2,91
Propano	C ₃	2,89	6,06
i-Butano	iC ₄	0,61	1,69
n-Butano	nC ₄	1,38	3,81
i-Pentano	iC ₅	0,43	1,48
n-Pentano	nC ₅	0,35	1,21
Hexanos	C ₆	0,17	0,75
Heptanos	C ₇	0,18	0,73
Octanos	C ₈	0,01	0,09
Nonanos	C ₉	0,00	0,00
Decanos	C ₁₀	0,00	0,00
Undecanos	C ₁₁	0,00	0,00

⁶ Información Suministrada por el campo en el documento: Certificado No: B-LAB-2012041524-0 Cromatografía

Dodecanos+	C ₁₂	0,00	0,00
Total		100	100

Nota. Información Suministrada por el campo en el documento: Certificado No: B-LAB-2012041524-0 Cromatografía.

Tabla 7

Propiedades calculadas del gas⁷

PROPIEDADES CALCULADAS DEL GAS		
Gravedad Específica del gas	0,7275	(Aire=1 a 14.73 psia & 60°F)
Peso molecular	21	lb/lb-mol
Factor Compresibilidad Z del Gas	0,9969	A 14,65 psia y 60 °F
Poder Calorífico Bruto Ideal	1063,0	BTU.ft-3 a 14.65psia, 60°F
Poder Calorífico Neto Ideal	961,8	BTU.ft-3 a 14.65psia, 60°F
Poder Calorífico Bruto Real	1072,7	BTU.ft-3 a 14.65psia, 60°F
Densidad Ideal Del Gas	0,8865	kg m-3 a 14.65psia, 60°F
Densidad Real Del Gas	0,8911	kg m-3 a 14.65psia, 15.0 °C
Presión Pseudo Critica	694,1	psia
Temperatura Pseudo Critica	387,4	Rankine
GPM (C2+)	2,39	

⁷ Idem 7

GPM (C3+)

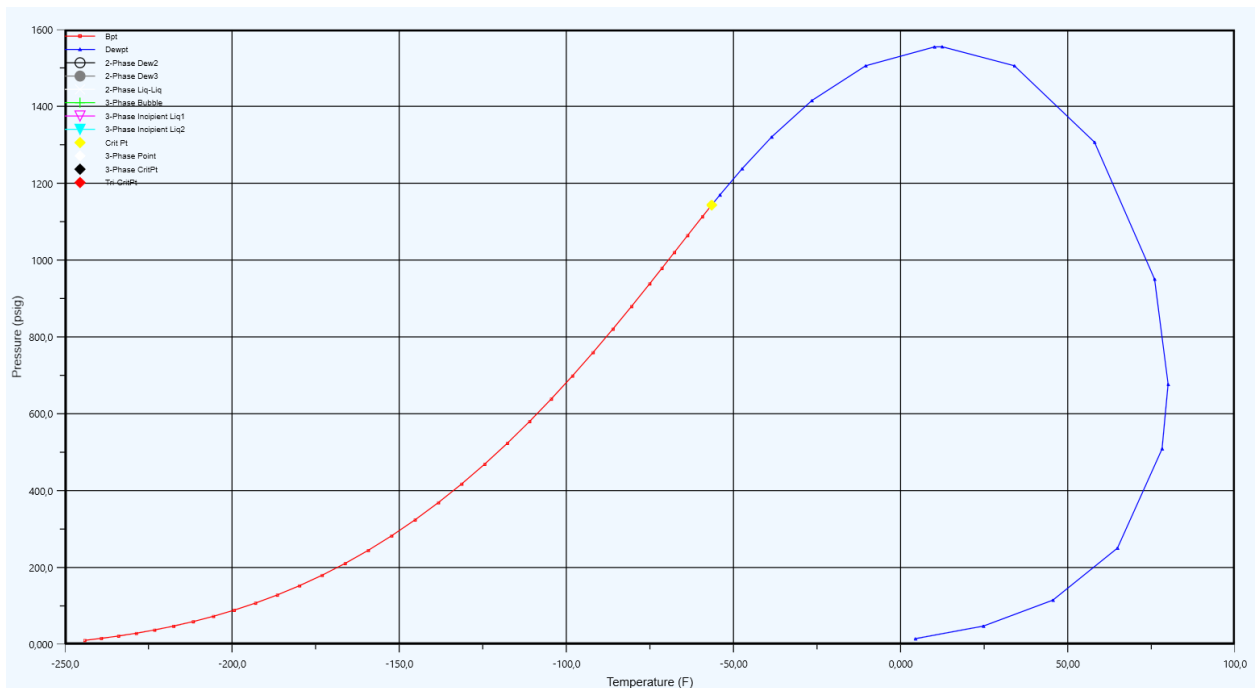
1,85

Nota. Información Suministrada por el campo en el documento: Certificado No: B-LAB-2012041524-0 Cromatografía.

La muestra fue tomada a una presión de 32 psig y una temperatura de 94 °F.

Figura 5.

Envoltante de fases gas campo seleccionado



Nota. Reporte de simulación Hysys V14.

Tabla 8.*Valores críticos y máximos*

VALORES CRÍTICOS Y MÁXIMOS DEL GAS	
Temperatura punto crítico	-56.52 [°F]
Presión punto crítico	1143 [psig]
Cricondentherm	80.02 [°F]
Cricondenbar	1555 [psig]

4.1.3. Equipo y condiciones de alivio

Se desea diseñar una tea elevada, tipo soportada por guayas o cables, para quema de gas natural de acuerdo con las condiciones de operación actuales del campo seleccionado y las características del gas descritas anteriormente. Además, se deben tener en cuenta las expectativas del pronóstico de gas asociado a incrementos de producción por perforación y estimulación de nuevos pozos. Las condiciones de alivio se determinan considerando el flujo máximo de quema de gas esperado, definido como 1 [MMscfd].

4.2. Cálculos conforme a los criterios establecidos en la norma API-521

Para asegurar la eficacia y seguridad de un sistema de tea, es fundamental realizar cálculos precisos basados en los criterios establecidos por la norma API-521. Esta norma proporciona directrices claras para el dimensionamiento y diseño de sistemas de alivio de presión, incluyendo las teas. En este subcapítulo, se detallarán los cálculos necesarios para dimensionar adecuadamente un sistema de Tea, considerando los flujos de gas, y otros factores críticos.

Para iniciar con el proceso de diseño de la tea se requieren los datos básicos que se indican en la tabla 7, estos se pueden obtener mediante cálculos utilizando la información disponible en la composición del gas.

Tabla 9.

Datos básicos dimensionamiento de tea

DATOS BÁSICOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO	
Tasa o rata de flujo másico, \dot{m}_g	[lb/h]
Peso molecular del gas, PM_g	[lb/lb-mol]
Temperatura del flujo, T	[°R]
Factor de compresibilidad, Z	Adimensional
Gravedad específica, γ_g	Adimensional
Calor de combustión, H _c	[BTU/lb]
Relación de alturas específicas, $k = C_p/C_v$	Adimensional
Presión de flujo en la punta, P	[psia]
Velocidad del viento para diseño, U_{inf}	[ft/s]
Humedad relativa, H _R	%

A continuación, se inicia el proceso de cálculos para determinar los valores numéricos desconocidos de la tabla 7.

4.2.1. Cálculos de flujo de masa del gas

Flujo Máximo de Diseño: Se establece que el flujo máximo de gas que el sistema de tea debe manejar es de 1 [MMscfd]. Lo primero es expresar el flujo volumétrico establecido en términos de flujo másico del gas, para lo cual se hace uso de la ecuación de estado.

Ecuación (1)

$$P\dot{V} = Z\dot{n}RT$$

En donde,

P : Presión [psia]

\dot{V} : Volumen del gas [ft³]

Z : Factor de compresibilidad del gas

\dot{n} : Número de moles [lb-mol]

R : Constante de los gases definida como 10,73159 [ft³.psia.lb/mol.°R]

T : Temperatura [°R]

Se aplican las siguientes consideraciones:

Ecuación (2)

$$\dot{V} = \dot{Q}g$$

$\dot{Q}g$: Flujo volumétrico del gas [scfd]; para este caso corresponde a 1.000.000 [scfd]

Además, se define la Ecuación 3:

Ecuación (3)

$$\dot{n} = \frac{\dot{m}g}{PMg}$$

$\dot{m}g$: Masa del gas

PMg : Peso molecular del gas

Reemplazando (2) y (3) en (1) y despejando $\dot{m}g$ se obtiene:

$$\dot{m}g = \frac{P\dot{Q}gPMg}{ZRT}$$

Para llevar a condiciones estándar se establecen los siguientes valores:

$$Z = 1$$

$$P = 14.7 \text{ psia}$$

$$T = 520 \text{ }^\circ R$$

De la tabla 6 se obtiene el valor del peso molecular del gas como $Pm.g = 21 \frac{lb}{lb} mol$

Todos los términos de la Ecuación (1) son conocidos, reemplazando y calculando se obtiene el flujo de masa de gas:

$$\dot{m}g = 2304.93 \left[\frac{lb}{h} \right]$$

4.2.2. Cálculo del calor de combustión

Los calores de combustión de los componentes del gas natural fueron obtenidos de Perry's Chemical Engineers' Handbook y la CRC Handbook of Chemistry and Physics, que proporcionan los siguientes valores en [BTU/lb]:

Tabla 10.*Calores de combustión del gas⁸*

Componente	% Molar	Calores de combustión [BTU/lb]	Contribución al calor de combustión [BTU/lb]
Dióxido de Carbono (CO ₂)	8,19	0	0
Nitrógeno (N ₂)	0,22	0	0
Metano (CH ₄)	83,54	-21300	-17794,02
Etano (C ₂ H ₆)	2,03	-22530	-457,359
Propano (C ₃ H ₈)	2,89	-21655	-625,8295
Iso-Butano (iC ₄ H ₁₀)	0,61	-21391	-130,4851
n-Butano (nC ₄ H ₁₀)	1,38	-21391	-295,1958
Iso-Pentano (iC ₅ H ₁₂)	0,43	-20765	-89,2895
n-Pentano (nC ₅ H ₁₂)	0,35	-20765	-72,6775
Hexano (C ₆ H ₁₄)	0,17	-20210	-34,357
Heptano (C ₇ H ₁₆)	0,18	-19830	-35,694
Octano (C ₈ H ₁₈)	0,01	-19540	-1,954
Total	100	HC=Σyi*HCi	-19536,861

⁸ Perry, R.H., Green, D.W., & Maloney, J.O. (Eds.). (1997). Perry's Chemical Engineers' Handbook (7th Edition). McGraw-Hill.

El calor de combustión total de la mezcla se obtiene sumando las contribuciones individuales de cada componente, como lo describe la siguiente ecuación:

Ecuación (4)

$$HC = \sum_{i=1}^n Y_i * HC_i$$

En donde,

HC: Calor de combustión total

Y_i: Fracción molar del componente i

HC_i: Calor de combustión del componente i

n: Número total de componentes en la mezcla

El calor de combustión total de la mezcla de gas natural es aproximadamente -19536,8 [BTU/lb]. El resultado es negativo porque el calor de combustión, por convención, se expresa como un valor negativo para indicar que es una reacción exotérmica, es decir, una reacción que libera energía. En otras palabras, cuando el gas se quema, libera calor, y esta liberación de energía se representa con un signo negativo en los cálculos termodinámicos.

Para fines prácticos, especialmente cuando se comunica el poder calorífico de un combustible en términos de energía disponible, es común usar el valor absoluto. Así que, en este contexto, podemos expresar el calor de combustión sin el signo negativo:

El calor de combustión de la mezcla es 19536,8 [BTU/lb]

Este valor representa la cantidad de energía liberada cuando una libra de la mezcla de gas natural se quema completamente.

4.2.3. Cálculo de la relación de calores específicos, $k = C_P/C_V$

La relación de calores específicos, también conocida como el coeficiente isentrópico k o el índice adiabático, es la relación entre la capacidad calorífica a presión constante C_P y la capacidad calorífica a volumen constante C_V .

Existe una ecuación empírica que relaciona la relación de calores específicos k de un gas con su gravedad específica γ_g . La gravedad específica γ_g de un gas es la relación entre la densidad del gas y la densidad del aire (a condiciones estándar).

Para gases comunes, especialmente hidrocarburos y mezclas de hidrocarburos, se pueden utilizar ecuaciones empíricas basadas en la gravedad específica. Una de las ecuaciones comúnmente utilizadas es:

Ecuación (5)

$$k = 1.3 - (0.31) \cdot (\gamma_g - 0.55)$$

De acuerdo con la tabla 6, el valor de la gravedad específica del gas γ_g es:

$$\gamma_g = 0.7275$$

Reemplazando el valor de la gravedad específica γ_g en la Ec. (5) y realizando los cálculos se obtiene el valor de la relación de calores específicos k :

$$k = 1.3 - (0.31) \cdot (0.7275 - 0.55)$$

$$k = 1.24$$

Los datos calculados y los ya conocidos se consolidan en la tabla 10:

Tabla 11.

Datos calculados y conocidos para el diseño de la Tea

DATOS BÁSICOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO		
Tasa o rata de flujo másico, \dot{m}_g	2304,93	[lb/h]
Peso molecular del gas, PM_g	21	[lb/lb-mol]
Temperatura del flujo, T	554	[°R]
Factor de compresibilidad, Z	0,9969	Adimensional
Gravedad específica, γ_g	0,7275	Adimensional
Calor de combustión, Hc	19536,8	[BTU/lb]
Relación de calores específicos, $k = C_p/C_v$	1,24	Adimensional
Presión de flujo en la punta de la Tea, P_2	14,7	[psia]
Velocidad del viento para diseño, U_{inf}	11	[ft/s]
Humedad relativa, H_R	85	%

4.2.4. Cálculo del diámetro de la Tea:

Usando la ecuación 28 de la sección 7.3.1.3.3 de la norma API-521, la cual permite hallar el número Mach (velocidad del sonido) en la tubería de salida, es decir en la punta o TIP de la Tea.

Ecuación (6)

$$Ma_2 = 1,702 * 10^{-5} \left(\frac{\dot{m}_g}{P_2 * d^2} \right) \left(\frac{Z * T}{PM_g} \right)^{0.5}$$

Donde,

Ma_2 : Número de Mach en la salida de la tubería (Punta de la Tea)

d^2 : Diámetro interior de la tubería, expresado en pies [ft]

Los demás términos de la ecuación (6) están descritos en la tabla 10.

De la sección 7.3.3.2.2, párrafo 1, de la norma API-521 podemos extraer que "Puede ser deseable permitir una velocidad de hasta 0,5 Mach para un flujo pico, de corta duración y poco frecuente, manteniendo 0,2 Mach para las condiciones más normales y posiblemente más frecuentes para Teas de baja presión."

Por lo anterior, se define realizar los cálculos del diámetro máximo asumiendo Mach = 0,2; aplicando la ecuación (6) y despejando para hallar el diámetro d_2 se obtienen los siguientes resultados:

Para efectos prácticos, los cálculos se realizan en Excel⁹.

Resolviendo la ecuación (6) obtenemos:

$$0,2 = (1.702 \times 10^{-5}) \times \frac{2304,93 \frac{\text{Lb}}{\text{h}}}{14,7 \text{ psia} \times d^2} \times \sqrt{\frac{(0,9969) \times (554)}{21}}$$

El diámetro de la Tea es:

$$d = 0,262 \text{ ft}$$

$$d = 3,140 \text{ in}$$

$$d = 3 \text{ in}$$

⁹ Producto de suscripción licenciado a nombre de Miguel Plazas, usuario miguel4830@hotmail.com

El calor liberado esta dado por:

Ecuación (7)

$$Q = m \dot{g} \times H_c$$

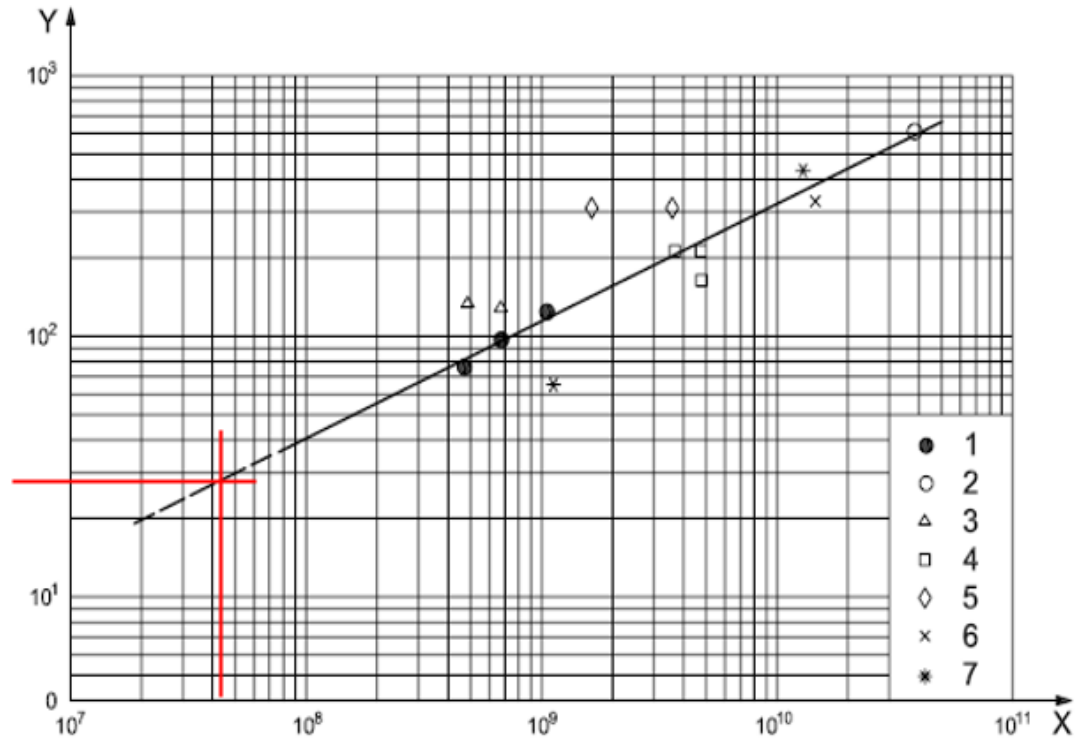
$$Q = \left(2304,93 \frac{\text{Lb}}{\text{h}} \right) \times \left(19536,8 \frac{\text{Btu}}{\text{Lb}} \right)$$

$$Q = 45'050.558 \text{ Btu/h}$$

Usando la figura No 8, de la sección 6.4.2.3.3 de la norma API-521 se obtiene la longitud de llama, $L = 28 \text{ ft}$.

Figura 6.

Imagen de la figura No 8, de la sección 6.4.2.3.3 de la norma API 521

**Key**

X heat release, expressed in British thermal units per hour

Y flame length (including any lift-off), expressed in feet

1 fuel gas (20-inch stack)

2 Algerian gas well

3 catalytic reformer — recycle gas (24-inch stack)

4 catalytic reformer — reactor effluent gas (24-inch stack)

5 dehydrogenation unit (12-inch stack)

6 hydrogen (31-inch stack)

7 hydrogen (30-inch stack)

NOTE Multiple points indicate separate observations or different assumptions of heat content.

Figure 8 — Flame length versus heat release — Industrial sizes and releases (USC units)

Para calcular la distorsión de llama causada por la velocidad del viento (11[ft/s]), se hace uso de las ecuaciones propuestas en la sección C.2.4 de la norma API-521:

Para empezar, se utiliza la ecuación (8) para hallar a densidad de masa del gas.

Ecuación (8)

$$\rho = \frac{P_2 * PMg}{R * T}$$

$$\rho = 0.052 \left[\frac{lb}{ft^3} \right]$$

Luego, utilizando la ecuación (9) se procede a calcular la tasa de flujo volumétrico de vapor, q :

Ecuación (9)

$$q = \frac{mg}{3600\rho}$$

Reemplazando los términos ya conocidos se obtiene:

$$q = 12,342 \text{ ACT } ft^3/s$$

La velocidad de salida en la punta de la Tea U_j , está definida por la ecuación (10):

Ecuación (10)

$$U_j = \frac{q}{(\pi d^2)/4}$$

Resolviendo la ecuación se obtiene $U_j = 228,926 \text{ [ft/s]}$

De acuerdo con lo indicado en la sección C.2.4 de la norma API-521, se define la velocidad del viento como $U_{inf} = 11 \text{ [ft/s]}$

$$\frac{U_{inf}}{U_j} = 0,048$$

Haciendo uso de la figura No 9 de la sección 6.4.2.3.3 de la norma API-521, se determinan los factores $\frac{\sum \Delta y}{L}$ y $\frac{\sum \Delta x}{L}$ con los cuales se especifican las dimensiones de la distorsión de la llama.

Figura 7.

Imagen de la figura No 9, de la sección 6.4.2.3.3 de la norma API-521

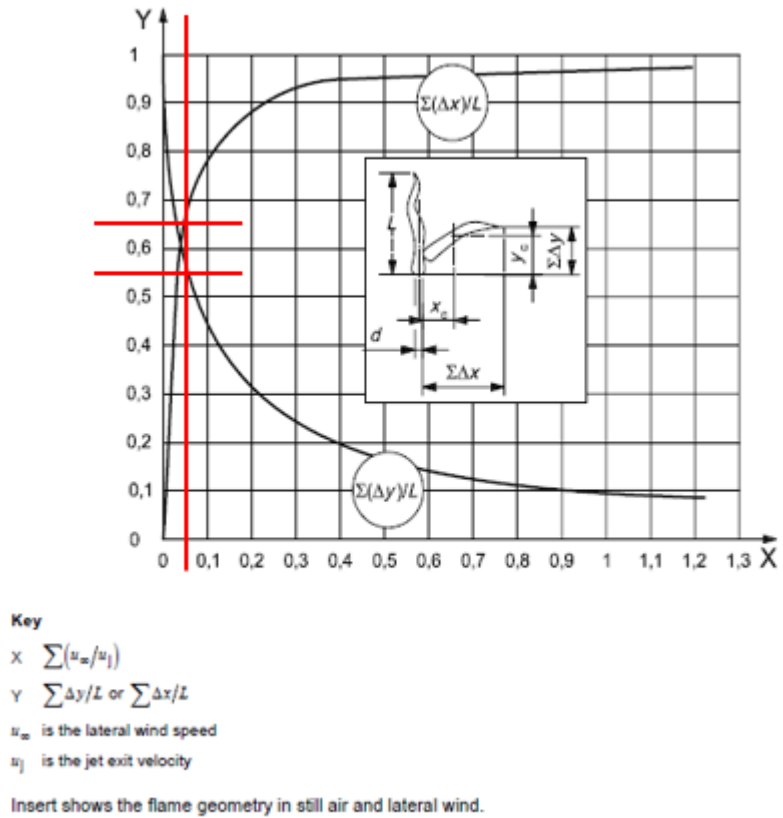


Figure 9 — Approximate flame distortion due to lateral wind on jet velocity from flare stack

$$\frac{\sum \Delta y}{L} = 0,55$$

$$\frac{\sum \Delta x}{L} = 0,65$$

Con la longitud de llama determinada de 28 [ft], se establece:

Distorsión de la llama $\sum \Delta y = 15,4$ [ft]

Distorsión de la llama $\Sigma\Delta x = 18,2 [ft]$

Para realizar el cálculo de la distancia del centro de la llama al objeto o punto considerado, se utiliza la ecuación 24 de la sección 6.4.2.3.3 de la norma API-521 la cual está definida de la siguiente manera:

Ecuación (11)

$$D = \sqrt{\frac{\tau F Q}{4 \pi K}}$$

Donde,

D = Distancia desde el centro de la llama al objeto o punto considerado

τ = Fracción de calor intensamente radiado, se obtiene mediante un proceso iterativo iniciando con $\tau = 1$.

$$\tau = 0,79 \left(\frac{100}{R_H} \right)^{1/16} \left(\frac{100}{D} \right)^{1/16}$$

R_H = Humedad relativa

K = Radiación máxima disponible [BTU /h ft²], como referencia tomamos máximo 500 [BTU/h ft²]

F = Fracción de calor radiante = 0,275

Resolviendo la ecuación (11) se obtiene:

$$D = 44,404 [ft]$$

$$D = 13,534 [m]$$

Para la altura H de la tea se establece un radio R = 25 [ft], medido desde el centro de la Tea hasta el objeto o punto considerado. Este radio R corresponde al radio de la zona estéril de la Tea.

Se utiliza la figura C.1 de la sección C.2.5 de la norma API-521 y se aplican las siguientes ecuaciones:

Ecuación (12)

$$H' = H + 1/2\Sigma\Delta_y$$

Ecuación (13)

$$R' = R - 1/2\Sigma\Delta_x$$

Ecuación (14)

$$D^2 = R'^2 + H'^2$$

Por el método de aproximación simple se obtiene:

$$R' = 15,9 [ft]$$

$$H' = 41,46 [ft]$$

$$H = 33,76 [ft]$$

$$H = 10,29 [m]$$

Por regulación nacional se sabe que la altura del punto de descarga o punta de la tea no puede ser menor de 15 [m], por lo tanto, la altura de la tea se define como $H = 50 [ft]$ o $15,24 [m]$.

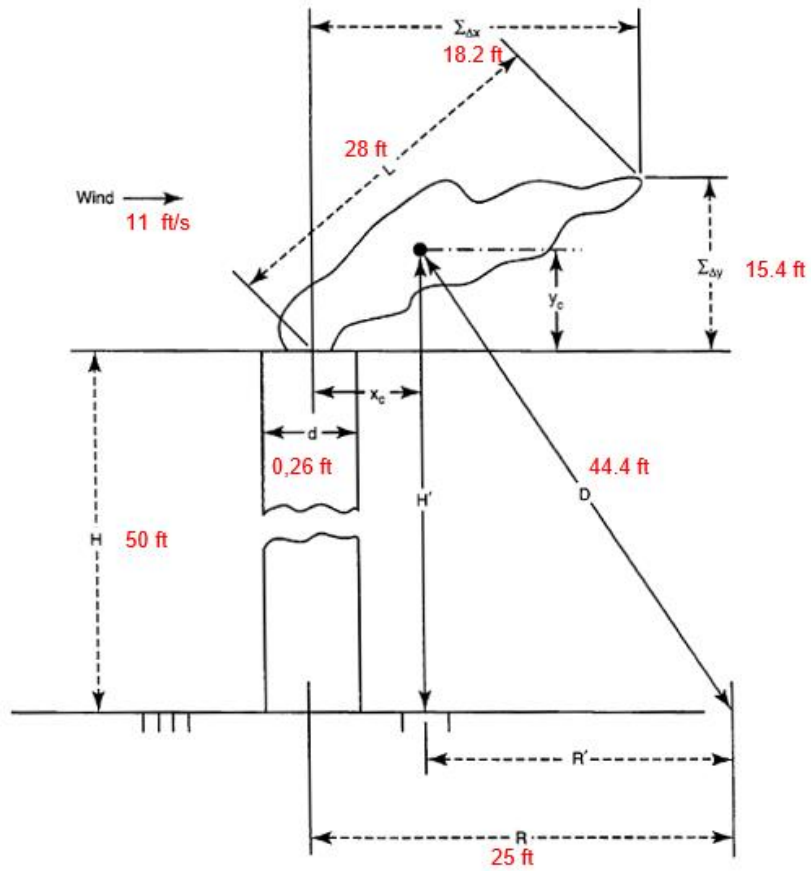
En la tabla 11 se presentan los resultados del dimensionamiento de la tea.

Tabla 12.*Dimensiones de la Tea*

DIMENSIONAMIENTO	VALOR
Flujo [MMscfd]	1
Diámetro [in]	3
Altura [ft]	50
Largo de Llama [ft]	28
Velocidad del Gas [ft/s]	228,46
Distorsión de la Llama Σx [ft]	18,2
Distorsión de la Llama Σy [ft]	15,4

Figura 8.

Imagen de la figura C.1 de la sección C.2.5 de la norma API-521 – Referencia de dimensiones de la Tea



4.3. Consideración de la eficiencia de combustión y la eficiencia de destrucción y remoción de contaminantes.

La eficiencia de combustión y la eficiencia de destrucción y remoción de contaminantes son parámetros críticos para el diseño y operación de los sistemas de tea en la industria de hidrocarburos. Estas eficiencias determinan la capacidad del sistema para oxidar completamente los hidrocarburos presentes en el gas natural, minimizando así las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y otros contaminantes. Este subcapítulo se enfoca en los cálculos teóricos necesarios para determinar dichas eficiencias, utilizando como referencia las normativas y metodologías establecidas por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) y el Ministerio de Minas y Energía de Colombia, específicamente las Resoluciones 40066 de 2022 y 40317 de 2023.

4.3.1. Eficiencia de la tea

La eficiencia en el proceso de quema de gas en la tea es esencial para maximizar la utilidad y minimizar el impacto ambiental en la industria petrolera. Una tea eficiente no solo asegura la combustión óptima de gases residuales, reduciendo así las emisiones nocivas, sino que también favorece la operación segura y sostenible del equipo y de las instalaciones circundantes. Por otro lado, una tea con bajo nivel de eficiencia puede generar múltiples problemas. Estos pueden abarcar desde la liberación de gases no quemados, que aumentan la huella de carbono y las emisiones contaminantes, hasta la generación de situaciones de riesgo debido a acumulaciones incontroladas de gas. Adicionalmente, la ineficiencia en el proceso de quema puede generar costos operativos adicionales y desgaste prematuro del equipo. Por ende, es imperativo abordar la eficiencia de la tea no solo desde un enfoque técnico y económico, sino también desde una perspectiva ambiental y de seguridad. Una tea eficiente refleja el compromiso de la industria con la excelencia operativa y la protección del medio ambiente.

Lo expuesto por Baukal Jr, C. E. (Ed.). (2013), en la década de 1980, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés), llevó a cabo varias pruebas para determinar la eficiencia de destrucción y la eficiencia de la combustión de una tea industrial que operaba en condiciones normales. Basándose en parte en estas pruebas, la EPA tomó varias decisiones sobre el diseño de una tea¹⁰.

Según el autor mencionado, los términos eficiencia de combustión y eficiencia de destrucción frecuentemente se han considerado sinónimos de manera errada. De hecho, estos dos conceptos son bastante diferentes. Una Tea que funciona con una eficiencia de combustión del 98% puede alcanzar una eficiencia de destrucción superior al 99,5%.

4.3.2. Eficiencia de combustión (CE)

Se refiere al grado en el cual un hidrocarburo (como el metano) se quema completamente en presencia de oxígeno. Una combustión completa idealmente produce dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O). No obstante, en la práctica, debido a diversas variables operacionales como la mezcla de aire/combustible, turbulencias, y la presencia de impurezas, la combustión puede no ser completa, produciendo emisiones no deseadas como monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (UHC), y otros contaminantes. La eficiencia de combustión se mide generalmente como el porcentaje de hidrocarburo inicial que se convierte en CO₂ y H₂O.

4.3.3. Eficiencia de Destrucción y Remoción (DRE)

Va un paso más allá y se refiere a la capacidad de un sistema para eliminar o reducir la concentración de un contaminante específico o un conjunto de contaminantes durante el proceso de combustión. En otras palabras, se enfoca en la eliminación de contaminantes no deseados.

¹⁰ Baukal Jr, C. E. (Ed.). (2013). *The John Zink Hamworthy Combustion Handbook: Volume 3—Applications*. CRC Press.

Mientras la eficiencia de combustión se centra en cuánto del hidrocarburo inicial se quema completamente, la eficiencia de destrucción se enfoca en cuánto de un contaminante no deseado se elimina durante el proceso de quema. Ambas métricas son cruciales para evaluar el rendimiento de los sistemas de tea.

El índice o indicador DRE (Destruction Removal Efficiency) es una métrica empleada en la industria, especialmente en sistemas de quema como las teas, para determinar la eficiencia con la que un sistema elimina o destruye contaminantes. Específicamente, el DRE mide el porcentaje de contaminantes orgánicos que son efectivamente destruidos o removidos durante el proceso de combustión.

Un DRE alto indica que la tea está funcionando de manera eficiente y que está quemando una gran proporción de los contaminantes presentes en el gas de alivio. Esto es fundamental tanto desde una perspectiva de seguridad operacional como ambiental.

Para los sistemas de tea, las regulaciones ambientales suelen exigir un DRE muy alto (por ejemplo, un 99% o más) para garantizar que las emisiones de compuestos orgánicos volátiles y otros contaminantes se reduzcan al mínimo.

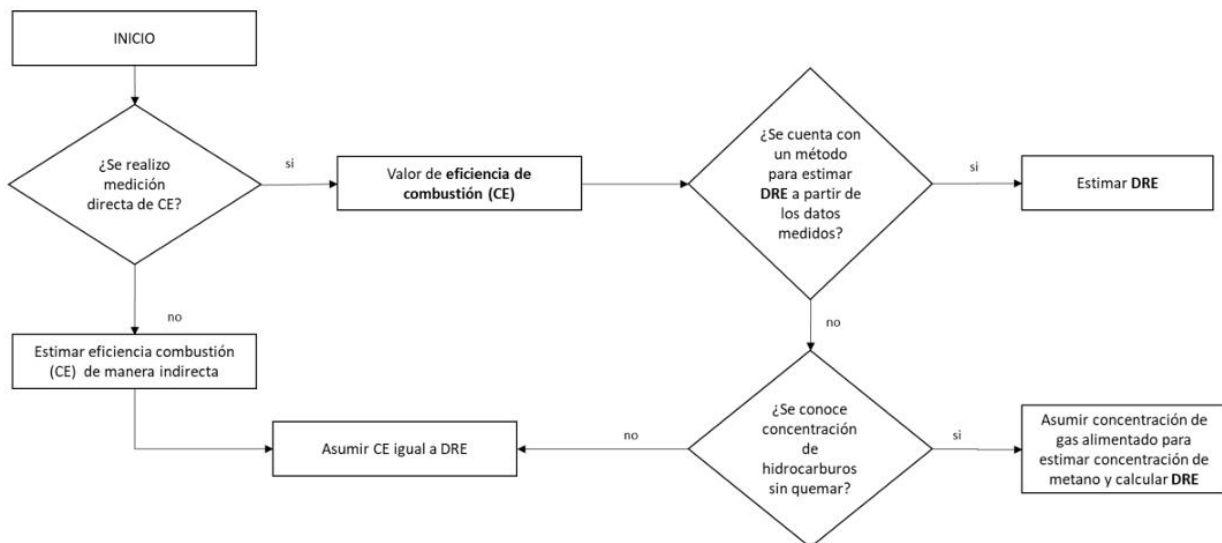
Un DRE bajo puede indicar problemas en el proceso de combustión, como una mezcla pobre de aire/combustible, velocidades de flujo inadecuadas o problemas en la ignición. Por lo tanto, monitorizar y optimizar el DRE es crucial para garantizar que los sistemas de tea operen de manera efectiva y cumplan con los estándares ambientales y de seguridad.

4.3.4. Metodologías para Evaluar la Eficiencia de Combustión y DRE

Según los lineamientos técnicos para la evaluación de eficiencia de una tea, emitidos por la ANH, existen dos metodologías para realizar dicha evaluación: la directa y la indirecta. La metodología directa incluye la medición in situ de las concentraciones de productos de combustión utilizando tecnologías avanzadas como la espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier (FTIR) y sistemas de imágenes hiperespectrales. La metodología indirecta se basa en modelos predictivos y simulaciones, considerando factores como el poder calorífico del gas, la velocidad del viento y el diámetro de la tea. Para determinar cuál de las dos opciones utilizar, los lineamientos técnicos proveen un árbol de decisión que se muestra en la figura 9.

Figura 9.

Árbol de decisión para determinar CE y DRE



Nota. Tomado de Lineamientos técnicos para la evaluación de eficiencia de tea para quema de gas natural en producción (ANH)

En este caso, se opta por la metodología indirecta, ya que, al tratarse de un diseño, aún no se pueden realizar las mediciones que sugiere la metodología directa. Por tanto, se procede a

estimar la eficiencia de combustión (CE) de manera indirecta y se asume que la eficiencia de combustión es igual a la eficiencia de destrucción y remoción (DRE).

4.3.5. *Cálculo teórico de eficiencia de combustión:*

Para el cálculo de la eficiencia de combustión de la tea se propone, pero no se limita, el trabajo de Kostiuk¹¹, donde la eficiencia de combustión puede ser estimada a partir de la siguiente ecuación, la cual considera valores de poder calorífico del gas, velocidad de la llama, diámetro de la tea y velocidad del viento, tal como se presenta a continuación:

Ecuación (15)

$$\mu = 1 - 0.00166 \left(\frac{LHV_{CH_4}}{LHV_f} \right)^3 * e^{\left(\frac{0.317 * U_w}{(g * d * U_f)^{1/3}} \right)}$$

Donde,

μ = Eficiencia de combustión CE;

LHV_{CH_4} = Poder calorífico inferior del metano por unidad de masa [MJ/Kg] = 50 [MJ/Kg];

LHV_f = Poder calorífico inferior de la corriente de gas a Tea por unidad de masa (MJ/Kg);

U_w = Velocidad del viento promedio [m/s];

U_f = Velocidad de salida de la llamarada [m/s];

g = Gravedad [m/s²];

d = Diámetro exterior de la tea [m];

¹¹ J. M. T. G. Kostiuk L, "Flare Research Project Final Report, November 1996 – September 2004".

Se utiliza la composición de gas y los valores del poder calorífico inferior (LHV) de cada componente para determinar el LHV_f . Para calcularlo, se multiplica la fracción molar de cada componente por su LHV y se suman los resultados. En la tabla 12 se presenta el resumen de los valores obtenidos.

Tabla 13.

Poder Calorífico Inferior de la Corriente de Gas a Tea

COMPOSICIÓN DEL GAS	PODER CALORIFICO		LHV _f
		INFERIOR LHV [MJ/kg]	[MJ/kg]
Metano (CH ₄)	83,54%	50	41,770
Dióxido de Carbono (CO ₂)	8,19%	0 (No es combustible)	0,000
Etano (C ₂ H ₆)	2,03%	47,8	0,970
Propano (C ₃ H ₈)	2,89%	46,4	1,341
Iso-Butano (iC ₄ H ₁₀)	0,61%	45,8	0,279
n-Butano (nC ₄ H ₁₀)	1,38%	45,8	0,632
Iso-Pentano (iC ₅ H ₁₂)	0,43%	44	0,189
n-Pentano (nC ₅ H ₁₂)	0,35%	44	0,154
Hexano (C ₆ H ₁₄)	0,17%	43	0,073
Heptano (C ₇ H ₁₆)	0,18%	42	0,076
Octano (C ₈ H ₁₈)	0,01%	41	0,004
Poder Calorífico Inferior de la Corriente de Gas a Tea			45,489

Los términos de la ecuación (15) ahora son todos conocidos:

$$\text{LHV}_{\text{CH}_4} = 50 \text{ [MJ/kg];}$$

$$\text{LHV}_f = 45,489 \text{ [MJ/kg];}$$

$$U_w = 3,35 \text{ [m/s];}$$

$$U_f = 69,77 \text{ [m/s];}$$

$$g = 9,81 \text{ [m/s}^2\text{];}$$

$$d = 0,0762 \text{ [m];}$$

Resolviendo la ecuación, obtenemos como resultado la eficiencia de combustión CE:

$$\mu = 0,9970702 \text{ o } 99,707\%$$

Por definición, como se había estipulado, el método indirecto plantea que $\text{CE} = \text{DRE}$, por tanto, la eficiencia de destrucción y remoción es:

$$\text{DRE} = 0,9970702 \text{ o } 99,707\%$$

4.4. Aplicación de metodologías de diseño óptimo y eficaz para el sistema de Tea.

El diseño óptimo y eficaz de un sistema de tea es un proceso complejo que requiere la integración de diversas metodologías y herramientas para asegurar un rendimiento seguro y eficiente. Existen varias metodologías establecidas en el campo de la ingeniería de procesos que proporcionan enfoques holísticos para el diseño de estos sistemas. Entre las más conocidas se encuentran la Metodología de Diseño de Ingeniería de Procesos (PDE)¹², la Metodología de

¹² Perry, R.H., Green, D.W., & Maloney, J.O. (Eds.). (1997). Perry's Chemical Engineers' Handbook (7th Edition). McGraw-Hill.

Diseño Basada en el Análisis de Riesgos¹³, y la Metodología de Diseño Integrado¹⁴. Aunque estos enfoques ofrecen una base sólida para la optimización del diseño, el alcance de este trabajo de monografía no se centra en una exploración profunda de estas metodologías.

En lugar de ello, este subcapítulo se enfoca en la validación del diseño del sistema de tea mediante el uso de software especializado. Para este propósito, se utiliza el software Flares de Enviroware srl, versión 2.1.159.0, del cual se dispone su respectiva licencia. Esta herramienta permite simular y evaluar el rendimiento del sistema bajo diversas condiciones operativas, proporcionando una validación práctica del diseño. A continuación, se ofrece una breve descripción de las metodologías mencionadas, seguida de una estructura detallada del análisis de validación utilizando el software Flares.

4.4.1. Metodología de Diseño de Ingeniería de Procesos (PDE)

La Metodología de Diseño de Ingeniería de Procesos se basa en la definición clara de los objetivos de diseño, la selección de componentes adecuados, y el uso de simulaciones para optimizar el rendimiento del sistema. Este enfoque incluye pasos clave como la definición de requerimientos, selección de tecnologías, simulación de procesos, análisis de sensibilidad y optimización, y validación mediante pruebas en campo.

¹³ Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2008). Guidelines for Hazard Evaluation Procedures (3rd Edition). Wiley-AIChE.

¹⁴ Pistikopoulos, E.N., & del Rio-Chanona, E.A. (2018). Process Systems Engineering: Volume 6: Multi-Parametric Model-Based Control. Wiley-VCH.

4.4.2. Metodología de diseño basada en el análisis de riesgos

Este enfoque se centra en la identificación y mitigación de riesgos asociados con el sistema de tea. A través de estudios de identificación de peligros (HAZID) y análisis de operabilidad y peligros (HAZOP), se desarrollan estrategias de mitigación para minimizar los riesgos. La simulación de escenarios de fallo y la optimización del diseño con un enfoque en la seguridad son componentes críticos de esta metodología.

4.4.3. Metodología de diseño integrado

La Metodología de Diseño Integrado involucra la colaboración interdisciplinaria y el uso de herramientas de simulación avanzadas en todo el ciclo de diseño. Este enfoque modular y escalable permite adaptarse a cambios en las condiciones operativas y regulaciones, y se enfoca en la sostenibilidad y eficiencia energética del sistema. La validación continua y la retroalimentación son esenciales para ajustar el diseño y asegurar su eficacia.

4.4.4. Validación del diseño mediante software Flares

4.4.4.1. Introducción al software Flares. El software Flares de Enviroware srl es una herramienta especializada para la simulación y evaluación del rendimiento de sistemas de tea. La versión 2.1.159.0, utilizada en este trabajo, permite modelar el comportamiento del sistema bajo diversas condiciones operativas, proporcionando una validación práctica y detallada del diseño. Para más información sobre el software, se puede visitar la página web www.enviroware.com.

4.4.4.2. Metodología de simulación. La simulación del sistema de tea se realizó utilizando los datos operativos y de diseño obtenidos en las etapas previas. El software Flares permite conocer la altura de la tea, el diámetro, la longitud de la llama y modelar la radiación y el perfil de ruido en función de la distancia. Los parámetros de entrada incluyeron la composición del gas, las tasas de flujo, las temperaturas operativas, y las características físicas del sistema.

4.4.4.3. Resultados de la simulación con Flares. A continuación, se presentan los datos consolidados en una tabla comparativa. Toda la simulación realizada con el software Flares, se puede encontrar en el apéndice A.

Tabla 14.*Comparativo resultados dimensionamiento*

DIMENSIONAMIENTO	CÁLCULO	CÁLCULO
	MANUAL	FLARES
Flujo [MMscfd]	1	1
Diámetro [in]	3	3
Altura [ft]*	33,76	35,4
Largo de Llama [ft]	28	35,4
Velocidad del Gas [ft/s]	228,46	254,98

* La altura indicada corresponde a la calculada, no obstante, por regulación nacional, la altura del punto de descarga a la atmosfera debe ser mínimo de 15 [m] por lo que se seleccionó una altura de 50 [ft].

4.4.4.4. Análisis de resultados. Los cálculos generales del diseño de la tea para determinar la altura y el diámetro son convergentes. El diámetro obtenido mediante las dos metodologías es el mismo (3 pulgadas). Se puede afirmar lo mismo respecto a la altura, ya que la diferencia es insignificante, estableciéndose la altura definitiva en 50 [ft] conforme a la regulación nacional.

Existe una diferencia más marcada en la estimación de la longitud de la llama. Esta discrepancia podría deberse a la incertidumbre en la determinación de los factores $\sum \Delta y/L$ y $\sum \Delta x/L$, los cuales se obtienen manualmente utilizando la gráfica de la figura 9 de la sección 6.4.2.3.3 de la norma API-521.

4.5. Análisis de sensibilidad de los cálculos ante diferentes escenarios operativos y condiciones ambientales

El análisis de sensibilidad es fundamental para evaluar cómo las variaciones en las condiciones operativas y ambientales pueden afectar el rendimiento del sistema de tea. Este subcapítulo presenta un análisis de sensibilidad que considera variaciones en el flujo de gas, cambios en la composición del gas y un incremento en la velocidad del viento. Estas variaciones se han seleccionado para representar escenarios operativos comunes y para identificar posibles áreas de mejora en el diseño y operación del sistema.

4.5.1. Metodología del análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se llevó a cabo utilizando simulaciones basadas en las condiciones operativas y ambientales definidas. Se evaluaron tres variables críticas: el flujo de gas, la composición del gas y la velocidad del viento. Para cada variable, se consideraron variaciones hacia arriba y hacia abajo en comparación con los valores de diseño.

Escenarios Operativos Considerados:

Escenario 1: Variación en el Flujo de Gas

Flujo de Diseño: 1 [MMscfd]

Flujo Reducido: 0,8 [MMscfd]

Flujo Incrementado: 1,2 [MMscfd]

Escenario 2: Cambio en la Composición del Gas

Composición de Diseño: (Fracción molar) CH₄: 83.54%, CO₂: 8.19%, C₂H₆: 2.03%, C₃H₈: 2.89%, otros componentes menores.

Composición Modificada: Incrementar CO₂ en un 5% (CH₄: 78.54%, CO₂: 13.19%, mantener otros componentes proporcionales).

Escenario 3: Incremento en la Velocidad del Viento

Velocidad de Diseño: 3.35 [m/s]

Velocidad Incrementada: 5 [m/s]

4.5.2. Resultados del análisis de sensibilidad

4.5.2.1. Eficiencia base. La eficiencia base ($\mu = 0,9970702$), es muy alta, lo que indica que el sistema de tea está diseñado para operar con una alta eficiencia de combustión bajo condiciones normales.

4.5.2.2. Variaciones en el flujo de gas. Se pudo notar que las variaciones en el flujo de gas analizadas no impactan la eficiencia de la tea. Los incrementos en el flujo de gas tienden a mejorar la eficiencia, lo cual se debe a que un mayor volumen de gas saliendo por el TIP, causa un aumento en la velocidad de salida y eso conlleva a un mayor arrastre de aire en la columna de gas permitiendo una mejor mezcla gas/aire y por consiguiente una mejor combustión. No ocurre lo mismo cuando el flujo de gas a tea disminuye, sin embargo, la eficiencia calculada no muestra grandes cambios, se nota un leve descenso, debido a que un menor volumen de gas saliendo por el mismo TIP, tiene una menor velocidad de salida y, por tanto, no se alcanza a lograr una buena relación estequiométrica para que la combustión del gas sea eficiente, produciendo humo y hollín en la salida de la tea.

4.5.2.3. Velocidad del viento incrementada. Un incremento en la velocidad del viento de 3,35 [m/s] a 5 [m/s] resultó en una disminución marginal de la eficiencia ($\mu=0.99697$). Esto sugiere que el sistema de tea tiene un diseño robusto que puede mantener una alta eficiencia incluso con variaciones significativas en las condiciones ambientales.

Sin embargo, para notar variaciones significativas en la eficiencia fue necesario asumir velocidades del viento superiores a 100 [ft/s] algo que en la zona donde se encuentra la tea nunca se ha presentado.

4.5.2.4. Cambio en la composición del gas. El incremento del contenido de CO₂ en el gas de 8,19% a 13,19% resultó en una mínima disminución de la eficiencia ($\mu=0.99674$). A pesar del cambio en la composición del gas, la eficiencia de combustión sigue siendo superior al 99%.

4.5.3. Discusión de los resultados obtenidos

Robustez del Sistema: Los resultados indican que el diseño del sistema de tea es robusto y puede mantener una alta eficiencia de combustión incluso con variaciones en las condiciones operativas y ambientales. Esto es una señal positiva de que el sistema está bien diseñado y es capaz de manejar diferentes escenarios sin comprometer significativamente su rendimiento.

Limitaciones de la Metodología: La ecuación de Kostiuk et al. utilizada en la metodología indirecta es una aproximación teórica que puede no capturar todos los factores que afectan la eficiencia de combustión en condiciones reales. En la práctica, factores como la turbulencia del flujo de gas, la calidad del mantenimiento del sistema y la exactitud de la instrumentación asociada pueden tener un impacto mayor en la eficiencia.

Importancia de Pruebas Reales: Aunque los cálculos teóricos muestran poca variación en la eficiencia, es crucial realizar pruebas operativas y de campo para validar estos resultados. Las condiciones reales pueden presentar desafíos no contemplados en los modelos teóricos, y las pruebas pueden revelar áreas de mejora no evidentes en el análisis teórico.

Las variaciones en la eficiencia de combustión observadas en los diferentes escenarios analizados son mínimas y no impactan de manera significativa la eficiencia global del sistema de tea. Esto sugiere que el sistema es robusto y bien diseñado para mantener una alta eficiencia de combustión bajo diversas condiciones operativas y ambientales. No obstante, es importante

complementar estos hallazgos con pruebas reales para asegurar que el rendimiento teórico se traduzca en un rendimiento óptimo en condiciones reales.

4.5.4. Resultados de los cálculos realizados

Los resultados detallados de los cálculos realizados se presentan en el apéndice B.

5. Estrategias y tecnologías emergentes para mitigar riesgos y reducir emisiones

En la industria petrolera, la mitigación de riesgos y la reducción de emisiones son aspectos fundamentales para garantizar una operación segura y sostenible. La implementación de estrategias y tecnologías emergentes no solo permite cumplir con las regulaciones ambientales y de seguridad, sino también mejorar la eficiencia operativa y reducir costos a largo plazo. Este capítulo aborda las estrategias convencionales y las tecnologías emergentes que se están adoptando en la industria para mitigar los riesgos asociados con la operación de sistemas de tea y reducir las emisiones contaminantes. A través de un análisis detallado, se explorarán diversas metodologías y herramientas innovadoras que contribuyen a una gestión ambiental más efectiva y a la protección de los recursos naturales. Además, se evaluará la viabilidad económica y operativa de estas tecnologías, proporcionando una visión integral para su implementación en el campo petrolero.

5.1. Estrategias convencionales para mitigar riesgos asociados con la operación del sistema de tea

La operación segura de un sistema de tea en la industria petrolera requiere la implementación de estrategias convencionales de mitigación de riesgos que han sido probadas y validadas a lo largo del tiempo. Estas estrategias se centran en la prevención de incidentes y la minimización de peligros a través de prácticas estandarizadas y procedimientos rigurosos. El mantenimiento preventivo, la inspección regular, y la capacitación continua del personal son componentes esenciales que aseguran la integridad operativa del sistema y la seguridad del entorno de trabajo. En este subcapítulo, se explorarán estas prácticas y se analizarán sus contribuciones al funcionamiento seguro y eficiente de los sistemas de tea, garantizando el cumplimiento de las normativas y la protección del personal y del medio ambiente.

5.1.1. Descripción de las prácticas y procedimientos estándar utilizados para minimizar los riesgos operativos.

La operación segura y eficiente de un sistema de tea en la industria petrolera depende en gran medida de la implementación de prácticas y procedimientos estándar que se han desarrollado y perfeccionado a lo largo del tiempo. Estas prácticas tienen como objetivo principal minimizar los riesgos operativos y garantizar la seguridad tanto del personal como del entorno. A continuación, se describen las principales estrategias y procedimientos estándar utilizados en la industria.

5.1.1.1. Mantenimiento preventivo. El mantenimiento preventivo es una práctica esencial que implica la realización regular de inspecciones y servicios en los equipos antes de que ocurran fallos. Esta estrategia permite identificar y corregir problemas potenciales antes de que se conviertan en fallos catastróficos. En el contexto de los sistemas de tea, el mantenimiento preventivo incluye la revisión periódica de componentes críticos como válvulas, tuberías, sistemas de ignición, y detectores de llama. La planificación y ejecución de estas actividades están basadas en un cronograma detallado que sigue las recomendaciones de los fabricantes y las normativas industriales.

- **Inspección y monitoreo.** La inspección y el monitoreo continuo son fundamentales para garantizar la operación segura de un sistema de tea. Las inspecciones regulares permiten detectar signos de desgaste, corrosión o cualquier otra anomalía que pueda comprometer la integridad del sistema. El monitoreo en tiempo real, por su parte, utiliza sensores avanzados para supervisar las condiciones operativas, tales como la presión, la temperatura y la presencia de llama. Estos datos se analizan

continuamente para asegurar que el sistema opere dentro de los parámetros seguros y para proporcionar alertas tempranas en caso de desviaciones.

- **Capacitación del personal.** El personal operativo debe estar adecuadamente capacitado para manejar los sistemas de tea y responder a situaciones de emergencia. Los programas de capacitación incluyen formación teórica y práctica sobre los procedimientos operativos estándar, el manejo de equipos de emergencia y la respuesta a incidentes. La capacitación continua asegura que el personal se mantenga actualizado con las mejores prácticas y las normativas vigentes, lo que es crucial para la prevención de accidentes y la mitigación de riesgos.
- **Implementación de protocolos de seguridad.** Los protocolos de seguridad son procedimientos estandarizados que se implementan para asegurar una respuesta rápida y efectiva ante cualquier situación de emergencia. Estos protocolos incluyen planes de evacuación, procedimientos de bloqueo y etiquetado (lockout/tagout), y el uso de equipos de protección personal (EPP). Además, se realizan simulacros regulares para evaluar la eficacia de estos protocolos y la preparación del personal.
- **Gestión de cambios.** La gestión de cambios es un procedimiento crítico para garantizar que cualquier modificación en el sistema de tea se realice de manera segura. Este proceso implica una evaluación exhaustiva de los riesgos asociados con los cambios propuestos, la implementación de medidas de mitigación y la documentación detallada de todas las modificaciones. La gestión de cambios asegura que el sistema continúe operando de manera segura y conforme a las normativas después de cualquier alteración.

5.2. Tecnologías emergentes en el campo de la mitigación de emisiones contaminantes

En la búsqueda constante de reducir las emisiones contaminantes y mejorar la eficiencia operativa, la industria petrolera ha comenzado a adoptar tecnologías emergentes que ofrecen soluciones innovadoras y efectivas. Estas tecnologías no solo contribuyen a minimizar el impacto ambiental, sino que también promueven la seguridad y la eficiencia en la operación de los sistemas de tea. A continuación, se presentan algunas de las tecnologías más prometedoras en este campo, con un enfoque especial en la tecnología de monitoreo y análisis de emisiones basada en inteligencia artificial.

5.2.1. Sistema de monitoreo AGNI de Sensia Solutions

Una de las tecnologías emergentes más avanzadas es el sistema de monitoreo AGNI de Sensia Solutions. Este sistema utiliza cámaras infrarrojas impulsadas por inteligencia artificial para la vigilancia continua y precisa de las llamas piloto y los gases quemados. El sistema AGNI está especialmente diseñado para calcular la eficiencia de destrucción y remoción (DRE) de las llamas, asegurando que se liberen menos hidrocarburos no quemados a la atmósfera, lo que reduce significativamente el impacto sobre el calentamiento global.

El sistema AGNI ofrece varias características innovadoras:

- **Monitoreo en Tiempo Real:** Permite la vigilancia continua de la eficiencia de combustión, proporcionando alertas en tiempo real sobre el rendimiento del sistema y detectando posibles problemas antes de que se conviertan en fallos críticos.
- **Análisis Basado en IA:** Utiliza algoritmos avanzados de procesamiento de imágenes para analizar la calidad de la combustión y la dispersión de gases, optimizando el proceso de quema y mejorando la eficiencia general del sistema.

- **Integración con Sistemas de Control:** El sistema puede integrarse con otros sistemas de control y supervisión a través de protocolos estándar como Modbus y OPC, facilitando una gestión centralizada y eficiente de las operaciones.

5.2.2. Otras tecnologías emergentes

Además del sistema AGNI, existen otras tecnologías emergentes que están revolucionando la mitigación de emisiones en la industria petrolera:

- **Captura y Almacenamiento de Carbono (CCS):** Esta tecnología permite la captura de CO₂ y otros gases de efecto invernadero directamente desde las emisiones de la tea, almacenándolos de manera segura en formaciones geológicas subterráneas.
- **Sistemas Avanzados de Combustión:** Incluyen quemadores de alta eficiencia y sistemas de ignición mejorados que aseguran una combustión completa y reducen la emisión de contaminantes.
- **Monitoreo y Análisis de Datos en la Nube:** Utiliza sensores avanzados y plataformas de análisis basadas en la nube para monitorear y optimizar las operaciones en tiempo real, facilitando una respuesta rápida a cualquier desviación de los parámetros operativos.

5.3. Estrategias específicas para reducir emisiones y garantizar la sostenibilidad ambiental

Reducir las emisiones y garantizar la sostenibilidad ambiental son objetivos prioritarios que requieren la implementación de estrategias específicas y bien definidas. Estas estrategias no solo buscan minimizar el impacto ambiental de las operaciones de extracción y procesamiento de hidrocarburos, sino también asegurar el cumplimiento de las normativas ambientales y la promoción de prácticas sostenibles. En este subcapítulo, se explorarán diversas estrategias enfocadas en la optimización del proceso de quema de gas, la integración de energías renovables, y la adopción de tecnologías avanzadas para la gestión de emisiones. Estas medidas son fundamentales para avanzar hacia una operación más sostenible y ambientalmente responsable.

5.3.1. Optimización del proceso de quema

Una de las estrategias más efectivas para reducir las emisiones es la optimización del proceso de quema de gas en las teas. Esto incluye ajustar los parámetros operativos para asegurar una combustión completa y eficiente. La implementación de sistemas de control avanzados, como el monitoreo en tiempo real y el uso de algoritmos de inteligencia artificial, permite ajustar continuamente el flujo de gas y las condiciones de combustión para maximizar la eficiencia y minimizar las emisiones de gases no quemados.

5.3.2. Integración de energías renovables

La integración de energías renovables en las operaciones petroleras es una estrategia clave para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. La energía solar y eólica pueden ser utilizadas para alimentar equipos auxiliares y sistemas de control, reduciendo así la huella de carbono de las operaciones. Además,

la utilización de biogás producido a partir de residuos orgánicos puede complementar el suministro de gas natural, mejorando la sostenibilidad del proceso de quema.

5.3.3. Captura y almacenamiento de carbono (CCS)

La tecnología de Captura y Almacenamiento de Carbono (CCS) es una solución emergente que permite capturar el CO₂ y otros gases de efecto invernadero antes de que sean liberados a la atmósfera. Estos gases pueden ser almacenados de manera segura en formaciones geológicas subterráneas, evitando su contribución al calentamiento global. La implementación de CCS en las operaciones de quema de gas es una medida efectiva para reducir significativamente las emisiones y cumplir con las regulaciones ambientales más estrictas.

5.3.4. Uso de sistemas avanzados de combustión

Los sistemas avanzados de combustión, como los quemadores de alta eficiencia y los sistemas de ignición mejorados, son fundamentales para asegurar una combustión completa y reducir las emisiones de contaminantes. Estos sistemas están diseñados para operar de manera eficiente bajo diversas condiciones operativas, optimizando el uso del combustible y minimizando la formación de productos de combustión incompleta, como el monóxido de carbono (CO) y los hidrocarburos no quemados.

5.3.5. Monitoreo y análisis de emisiones

El monitoreo continuo y el análisis de emisiones son componentes esenciales de una estrategia eficaz para la gestión ambiental. El uso de sensores avanzados y sistemas de análisis de datos permite detectar y cuantificar las emisiones en tiempo real, facilitando la identificación de fuentes de contaminación y la implementación de medidas correctivas. La integración de estos sistemas con plataformas de análisis basadas en la nube permite una gestión centralizada y eficiente

de las operaciones, asegurando el cumplimiento de las normativas ambientales y la mejora continua de los procesos.

5.4. Viabilidad económica y operativa de las tecnologías propuestas

La adopción de tecnologías emergentes para mitigar riesgos y reducir emisiones en sistemas de tea conlleva una evaluación detallada de su viabilidad económica y operativa. Este análisis es crucial para determinar si las inversiones necesarias son justificables en términos de retorno económico y mejoras operativas. A continuación, se presentan los aspectos clave a considerar.

5.4.1. Evaluación de los costos de implementación

El primer paso en la evaluación económica es estimar los costos de implementación de las tecnologías propuestas. Estos costos incluyen la adquisición de equipos, la instalación, y los gastos operativos iniciales. A continuación, se describen algunos ejemplos específicos:

5.4.1.1. Sistema de monitoreo AGNI de Sensia Solutions.

- Costo del equipo: Aproximadamente \$100,000 a \$150,000 USD dependiendo de la configuración y las capacidades adicionales (e.g., integración con sistemas de análisis de datos en la nube).
- Instalación y puesta en marcha: Aproximadamente \$20,000 a \$30,000 USD, incluyendo la calibración y el entrenamiento del personal.

5.4.1.2. Sistemas avanzados de combustión.

- Costo del quemador de alta eficiencia: Alrededor de \$10,000 a \$30,000 USD por unidad.
- Sistemas de ignición mejorados: Aproximadamente \$15,000 a \$25,000 USD.

5.4.1.3. Tecnología de captura y almacenamiento de carbono (CCS).

- Costo de instalación: Dependiendo del tamaño y la capacidad, los costos pueden variar entre \$1 millón y \$5 millones USD.
- Gastos operativos: Costos adicionales para el almacenamiento y monitoreo continuo.

5.4.2. Beneficios económicos

Los beneficios económicos de implementar estas tecnologías pueden ser significativos y se manifiestan en varias formas:

- Reducción de multas y sanciones: El cumplimiento de las regulaciones ambientales más estrictas puede evitar multas y sanciones costosas. Las regulaciones cada vez más estrictas pueden imponer multas considerables por exceso de emisiones.
- Incentivos fiscales: En muchos países, existen incentivos fiscales y subsidios para las empresas que invierten en tecnologías limpias y reducen sus emisiones de carbono. Estos incentivos pueden incluir deducciones fiscales y subvenciones directas.
- Ahorro en costos operativos: La optimización de la combustión y el monitoreo en tiempo real pueden reducir el consumo de combustible y mejorar la eficiencia operativa, resultando en ahorros significativos a largo plazo.
- Mejora de la imagen corporativa: La adopción de tecnologías sostenibles puede mejorar la reputación de la empresa y aumentar su atractivo para los inversores y socios comerciales que valoran la responsabilidad ambiental.

5.4.3. Retorno de inversión (ROI)

El análisis del retorno de inversión (ROI) es esencial para justificar los gastos iniciales. El ROI se calcula considerando los ahorros operativos, los beneficios fiscales y la reducción de riesgos frente a la inversión inicial. Aquí hay un ejemplo simplificado:

- Inversión Inicial Total: \$500,000 USD (incluyendo sistemas de monitoreo, quemadores y CCS).
- Ahorros anuales en costos operativos: \$100,000 USD.
- Beneficios fiscales y reducción de multas: \$50,000 USD por año

Una formula comúnmente usada para calcular el ROI es la siguiente:

$$ROI = \frac{AA + BF}{Inv}$$

Donde,

AA: Ahorros anuales

BF: Beneficios fiscales

Inv: Inversión inicial

$$ROI = \frac{100.000 + 50.000}{500.000} = 0.3$$

Esto indica que el ROI sería del 30%, lo que sugiere que la inversión se recuperaría en aproximadamente 3.3 años.

5.4.4. Viabilidad operativa

La viabilidad operativa se refiere a la capacidad de integrar las nuevas tecnologías en la infraestructura existente y gestionar sus requisitos de mantenimiento y operación.

- **Compatibilidad con la infraestructura existente:** Las tecnologías deben ser compatibles con los sistemas actuales de control y monitoreo para evitar costosos ajustes y modificaciones.
- **Requerimientos de mantenimiento:** La adopción de nuevas tecnologías implica una curva de aprendizaje para el personal y posibles costos adicionales de mantenimiento. Sin embargo, muchas tecnologías avanzadas están diseñadas para reducir la necesidad de mantenimiento frecuente.
- **Capacitación del personal:** Es esencial proporcionar capacitación adecuada al personal para asegurar una operación eficiente y segura de las nuevas tecnologías. Esto puede incluir formación en el uso de nuevos sistemas de monitoreo, ajustes operativos y procedimientos de emergencia.

6. Implementación y recomendaciones finales

La implementación de un sistema de tea en un campo petrolero colombiano requiere una planificación meticulosa y un enfoque estratégico para asegurar su éxito y sostenibilidad. Este capítulo proporciona una guía detallada sobre la planificación de la implementación, recomendaciones para la gestión y operación efectiva del sistema de tea, identificación de posibles riesgos y obstáculos, y sugerencias para su mitigación. Finalmente, se presentan conclusiones y reflexiones sobre el impacto del diseño del sistema de tea en el campo petrolero y el medio ambiente.

6.1. Planificación de la implementación del sistema de tea en el campo petrolero colombiano

La planificación de la implementación del sistema de tea en un campo petrolero colombiano se basa en los lineamientos del Project Management Institute (PMI) descritos en el PMBOK Guide¹⁵. Se propone un plan de gestión del proyecto que abarca la gestión del alcance, la gestión del cronograma, la gestión de costos, la gestión de los recursos humanos (capacitación del personal) y la validación y pruebas, con un enfoque integral en la calidad del proyecto.

6.1.1. Gestión del alcance

El alcance del proyecto incluye la instalación de un sistema de tea conforme a las normas API 521 y API 537, con capacidad para manejar hasta 1 [MMscfd] de gas natural. El sistema debe incorporar un piloto de encendido confiable, un sistema de detección de llama y sistemas

¹⁵ PMBOK Guide es una marca registrada del Project Management Institute. Por sus siglas en inglés PMBOK significa: Cuerpo de conocimientos para la gestión de proyectos.

avanzados de monitoreo y control. Este plan se enfoca en asegurar que todos los requisitos técnicos y normativos se cumplan, garantizando una operación segura y eficiente.

6.1.2. Gestión del cronograma

El cronograma del proyecto se desarrollará utilizando herramientas de gestión de proyectos como el diagrama de Gantt. Las principales fases del proyecto incluyen:

- Inicio del Proyecto (2 semanas): Revisión y aprobación del plan de gestión del proyecto, definición del equipo del proyecto y asignación de roles.
- Planificación Detallada (4 semanas): Elaboración de los planos de ingeniería y especificaciones técnicas, y definición de los procedimientos de adquisición y contratación de proveedores.
- Adquisición de Equipos (8 semanas): Selección y contratación de proveedores, compra y entrega de equipos y materiales necesarios.
- Instalación y Configuración (12 semanas): Instalación del sistema de tea y componentes asociados, e integración con sistemas existentes de monitoreo y control.
- Capacitación del Personal (4 semanas): Implementación de programas de capacitación para el personal operativo, y simulacros y ejercicios de emergencia.
- Validación y Pruebas (6 semanas): Realización de pruebas exhaustivas del sistema, validación de los resultados y ajustes finales.
- Cierre del Proyecto (2 semanas): Revisión final y aprobación del sistema, y documentación y entrega formal del proyecto.

El diagrama de Gantt correspondiente se encuentra disponible en el Apéndice C.

6.1.3. Gestión de costos

El presupuesto del proyecto debe cubrir todos los costos asociados, desde la adquisición de equipos hasta la capacitación del personal. Una estimación inicial del presupuesto se presenta en la tabla 14.

Tabla 15.

Estimación inicial de costos del proyecto.

CATEGORÍA	ÍTEM	COSTO (Miles de USD)
Adquisición de Equipos	Sistemas de monitoreo y control	150
Adquisición de Equipos	Sistemas de ignición y detección de llama	50
Adquisición de Equipos	Accesorios y otros materiales	100
Instalación y Configuración	Mano de obra	100
Instalación y Configuración	Materiales y herramientas	50
Instalación y Configuración	Gastos imprevistos	50
Capacitación del Personal	Programas de formación y simulacros	10
Capacitación del Personal	Documentación y manuales de operación	5
Validación y Pruebas	Realización de pruebas y ajustes	30

Validación y Pruebas	Servicios de auditoría y certificación	20
Contingencia	Reserva para cubrir sobrecostos	50
Total		615

6.1.4. Plan de capacitación

La capacitación del personal es esencial para garantizar la operación segura y eficiente del sistema de tea. El plan de capacitación que se propone incluye:

- Capacitación Teórica

Introducción a los sistemas de tea y sus componentes.

Normativas y estándares aplicables (API 521 y API 537).

- Capacitación Práctica

Operación y mantenimiento de los sistemas de ignición y detección de llama.

Procedimientos de monitoreo y control en tiempo real.

- Simulacros y Ejercicios de Emergencia

Ejercicios prácticos para manejar situaciones de emergencia.

Revisión de protocolos de seguridad y respuesta rápida.

6.1.5. Validación y pruebas

La fase de validación y pruebas es crítica para asegurar que el sistema de tea funcione conforme a los requisitos de diseño y las normativas aplicables. Las actividades que se proponen incluyen el desarrollo de un plan de pre-Comisionamiento, Comisionamiento y puesta en marcha exhaustivo en el que como mínimo se consideren los siguientes aspectos:

- Pruebas de Funcionamiento

Verificación de la operación correcta de todos los componentes.

Ajustes y calibraciones necesarias.

- Pruebas de Eficiencia de Combustión

Evaluación de la eficiencia de combustión utilizando métodos indirectos y directos.

Ajustes para optimizar la eficiencia y minimizar las emisiones.

- Auditoría y Certificación

Realización de auditorías internas y externas para asegurar el cumplimiento normativo.

Obtención de certificaciones necesarias para la operación del sistema.

6.2. Recomendaciones para la gestión y operación efectiva del sistema de tea

La gestión y operación efectiva de un sistema de tea en la industria petrolera requiere la implementación de estrategias bien definidas y procedimientos rigurosos. Estas recomendaciones están diseñadas para asegurar la eficiencia operativa, la seguridad del personal y la sostenibilidad ambiental, alineándose con las normativas y estándares de la industria.

6.2.1. Monitoreo continuo

El monitoreo continuo es fundamental para la operación segura y eficiente de un sistema de tea. Se recomienda la implementación de sistemas avanzados de monitoreo en tiempo real que utilicen sensores de última generación y tecnologías de detección de llama y emisión de gases. Los sistemas de monitoreo deben estar integrados con plataformas de análisis de datos que permitan la supervisión constante de las condiciones operativas, detectando cualquier anomalía de inmediato. Estos sistemas no solo proporcionan alertas tempranas de posibles fallos, sino que también facilitan la optimización de los parámetros operativos para mejorar la eficiencia de combustión y reducir las emisiones.

6.2.2. Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo es una práctica esencial para garantizar la longevidad y el rendimiento óptimo del sistema de tea. Se debe establecer un programa de mantenimiento regular que incluya inspecciones periódicas y servicios de mantenimiento para todos los componentes críticos, como válvulas, tuberías, sistemas de ignición y detectores de llama. El mantenimiento preventivo debe basarse en un cronograma detallado, siguiendo las recomendaciones de los fabricantes y las mejores prácticas de la industria. Además, es crucial registrar todas las actividades de mantenimiento en un sistema de gestión de activos para facilitar la planificación futura y la resolución de problemas.

6.2.3. Optimización del proceso de combustión

La optimización del proceso de combustión es clave para maximizar la eficiencia y minimizar las emisiones de gases no quemados. Se recomienda ajustar continuamente los parámetros operativos del sistema de tea, como el flujo de gas y la mezcla de aire, utilizando datos de monitoreo en tiempo real. La implementación de algoritmos de control avanzado y técnicas de inteligencia artificial puede mejorar significativamente la calidad de la combustión, asegurando una quema completa y eficiente de los gases residuales. Además, la evaluación periódica de la eficiencia de combustión mediante métodos directos e indirectos permite identificar oportunidades de mejora y ajustar los parámetros operativos en consecuencia.

6.2.4. Capacitación continua del personal

El personal operativo debe estar adecuadamente capacitado para manejar el sistema de tea y responder a situaciones de emergencia. Se debe implementar un programa de capacitación continua que incluya formación teórica y práctica sobre los procedimientos operativos estándar, el manejo de equipos de emergencia y la respuesta a incidentes. La capacitación debe actualizarse

regularmente para incorporar las últimas tecnologías y prácticas de la industria, asegurando que el personal esté siempre preparado para operar el sistema de manera segura y eficiente. Además, la realización de simulacros y ejercicios de emergencia periódicos ayuda a mejorar la preparación y la capacidad de respuesta del personal.

6.2.5. *Gestión de emisiones*

La gestión de emisiones es crucial para cumplir con las normativas ambientales y minimizar el impacto ambiental de las operaciones de quema de gas. Se recomienda la implementación de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CCS) para reducir las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero. Además, se deben utilizar sistemas avanzados de filtración y purificación para minimizar la emisión de contaminantes. La integración de sistemas de monitoreo de emisiones en tiempo real permite la detección y cuantificación precisa de las emisiones, facilitando la implementación de medidas correctivas de manera oportuna.

6.2.6. *Revisión y actualización de protocolos de seguridad*

Los protocolos de seguridad deben revisarse y actualizarse regularmente para asegurar que estén alineados con las últimas normativas y mejores prácticas de la industria. Esto incluye la implementación de procedimientos estandarizados para la operación y el mantenimiento del sistema de tea, así como la respuesta a situaciones de emergencia. La gestión de cambios es un procedimiento crítico que garantiza que cualquier modificación en el sistema de tea se realice de manera segura. Este proceso implica una evaluación exhaustiva de los riesgos asociados con los cambios propuestos, la implementación de medidas de mitigación y la documentación detallada de todas las modificaciones.

6.3. Posibles riesgos y obstáculos en la implementación y sugerencias para su mitigación

La implementación de un sistema de tea en un campo petrolero puede enfrentar diversos riesgos y obstáculos que pueden afectar tanto el cronograma como el presupuesto del proyecto. Identificar estos riesgos y desarrollar estrategias de mitigación es crucial para garantizar el éxito del proyecto. A continuación, se describen algunos de los riesgos más comunes y las sugerencias para su mitigación.

6.3.1. Riesgos financieros

Uno de los principales riesgos en la implementación de un sistema de tea es el sobrecoste debido a variaciones inesperadas en los precios de los equipos y materiales. Este riesgo puede ser mitigado mediante la inclusión de un margen de contingencia en el presupuesto del proyecto, que permita cubrir gastos imprevistos sin comprometer la viabilidad financiera del proyecto. Además, se recomienda establecer contratos de precios fijos con los proveedores para asegurar estabilidad en los costos.

6.3.2. Retrasos en el cronograma

Los retrasos en la entrega de equipos y materiales, así como en la ejecución de trabajos críticos, pueden extender significativamente el cronograma del proyecto. Para mitigar este riesgo, es esencial realizar una planificación detallada y realista del cronograma, incluyendo hitos claros y fechas límite para cada fase del proyecto. La implementación de un sistema de gestión de proyectos basado en software también puede ayudar a monitorear el progreso y detectar posibles retrasos a tiempo, permitiendo la toma de medidas correctivas.

6.3.3. Riesgos técnicos

Los problemas técnicos durante la instalación y configuración del sistema de tea pueden afectar su desempeño y seguridad. Para mitigar estos riesgos, se recomienda realizar una evaluación exhaustiva de la infraestructura existente y la compatibilidad de los nuevos equipos

antes de la adquisición. Además, se recomienda contar con un equipo de ingenieros y técnicos calificados durante la instalación para ayudar a resolver cualquier problema técnico de manera eficiente.

6.3.4. *Riesgos de seguridad*

La seguridad del personal y las instalaciones es una prioridad en la implementación de un sistema de tea. Los riesgos de seguridad incluyen fallos en el sistema de ignición, detección de llama, y fugas de gas. Para mitigar estos riesgos, se deben implementar estrictos protocolos de seguridad y procedimientos operativos estándar. La capacitación continua del personal en medidas de seguridad y respuesta a emergencias es esencial para garantizar una operación segura. Además, se deben realizar simulacros regulares para evaluar la preparación del personal y la eficacia de los protocolos de seguridad.

6.3.5. *Riesgos ambientales*

La implementación de un sistema de tea también puede presentar riesgos ambientales, como la emisión de gases no quemados y la contaminación del aire. Para mitigar estos riesgos, es crucial implementar tecnologías avanzadas de monitoreo y control de emisiones. La adopción de sistemas de captura y almacenamiento de carbono (CCS) puede ayudar a reducir las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero. Además, se deben seguir estrictamente las normativas ambientales y realizar auditorías periódicas para asegurar el cumplimiento de estas.

6.3.6. *Obstáculos regulatorios*

El cumplimiento de las normativas y regulaciones locales e internacionales puede representar un obstáculo significativo en la implementación del sistema de tea. Para superar estos obstáculos, es necesario realizar un análisis exhaustivo de los requisitos regulatorios y asegurar que todos los aspectos del diseño y operación del sistema cumplan con las normativas aplicables.

La colaboración con expertos en regulación y la participación en auditorías y revisiones regulatorias pueden facilitar el cumplimiento normativo y evitar sanciones.

6.4. Conclusiones y reflexiones sobre el impacto del diseño del sistema de tea en el campo petrolero y el medio ambiente.

En este último capítulo, se presentan las conclusiones y reflexiones sobre el impacto del diseño e implementación del sistema de tea en el campo petrolero seleccionado. Este análisis integral ha abarcado desde la planificación y diseño hasta la operación y mantenimiento del sistema, destacando la importancia de cumplir con las normativas ambientales y de seguridad, y adoptando tecnologías emergentes para mejorar la eficiencia y sostenibilidad. Las reflexiones sobre el impacto ambiental y las estrategias implementadas ofrecen una visión holística de los beneficios y desafíos asociados con la gestión de emisiones y la operación segura de sistemas de tea en la industria petrolera.

6.4.1. Conclusiones

El diseño e implementación de un sistema de tea en el campo petrolero seleccionado ha demostrado ser una iniciativa crucial para mejorar la eficiencia operativa y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. A lo largo de esta monografía, se han abordado diversos aspectos técnicos, normativos y operativos, proporcionando una visión integral del proceso de diseño y las mejores prácticas a seguir.

6.4.1.1. *Eficiencia operativa.* La implementación de un sistema de tea diseñado conforme a las normas API 521 y API 537 ha permitido una mejora significativa en la eficiencia de combustión. Los sistemas de ignición y detección de llama avanzados, junto con el monitoreo en tiempo real, aseguran una quema completa del gas residual, minimizando la emisión de gases no quemados y mejorando la seguridad operativa.

6.4.1.2. *Cumplimiento normativo.* La adherencia a las normativas nacionales e internacionales ha sido un aspecto fundamental en el diseño del sistema de tea. El cumplimiento de las regulaciones ambientales y de seguridad garantiza que las operaciones se realicen de manera responsable y sostenible, reduciendo el riesgo de sanciones y mejorando la reputación del campo petrolero.

6.4.1.3. *Gestión de riesgos.* La identificación y mitigación de riesgos potenciales durante la implementación y operación del sistema de tea han sido claves para asegurar el éxito del proyecto. La inclusión de márgenes de contingencia en el presupuesto, la planificación detallada del cronograma y la capacitación continua del personal han contribuido a una operación segura y eficiente.

6.4.2. *Reflexiones sobre el impacto en el medio ambiente*

El diseño y la implementación de un sistema de tea no solo tienen un impacto directo en las operaciones del campo petrolero, sino también en el medio ambiente. Las siguientes reflexiones destacan la importancia de esta iniciativa en términos de sostenibilidad ambiental y responsabilidad corporativa.

6.4.2.1. Reducción de emisiones. Uno de los principales beneficios del sistema de tea es la reducción significativa de emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente metano y CO₂. La quema eficiente del gas residual y la adopción de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CCS) contribuyen a minimizar la huella de carbono del campo petrolero, apoyando los esfuerzos globales para mitigar el cambio climático.

6.4.2.2. Protección de la calidad del aire. Al minimizar la emisión de gases no quemados y contaminantes, el sistema de tea ayuda a mejorar la calidad del aire en las comunidades cercanas. Esto no solo protege la salud pública, sino que también demuestra el compromiso del campo petrolero con la responsabilidad ambiental.

6.4.2.3. Sostenibilidad a largo plazo. La implementación de prácticas sostenibles en la gestión de residuos y emisiones es esencial para la viabilidad a largo plazo de las operaciones petroleras. El diseño del sistema de tea, enfocado en la eficiencia y el cumplimiento normativo, establece un precedente para futuras iniciativas en el campo de la sostenibilidad industrial.

6.4.2.4. Innovación y tecnología. La adopción de tecnologías emergentes en el diseño y operación del sistema de tea refleja un enfoque proactivo hacia la innovación. Las herramientas avanzadas de monitoreo y control no solo mejoran la eficiencia operativa, sino que también permiten una gestión más precisa y efectiva de las emisiones, posicionando al campo petrolero como un líder en la adopción de tecnologías sostenibles.

El diseño e implementación del sistema de tea en el campo petrolero seleccionado han demostrado ser fundamentales para mejorar la eficiencia operativa, cumplir con las normativas ambientales y de seguridad, y reducir significativamente el impacto ambiental de las operaciones. A través de una planificación detallada, una gestión efectiva de riesgos y la adopción de

tecnologías avanzadas, se ha establecido un sistema robusto y sostenible que sirve como modelo para futuras iniciativas en la industria petrolera.

Este trabajo de monografía concluye resaltando la importancia de integrar consideraciones ambientales y de sostenibilidad en el diseño y operación de sistemas industriales. Al seguir las mejores prácticas y estándares internacionales, se puede lograr un equilibrio entre la eficiencia operativa y la protección del medio ambiente, contribuyendo así a un futuro más sostenible para la industria petrolera.

Referencias bibliográficas

Abu, Patchigolla, K., Simms, N., & Anthony, E. J. (2023). Natural Gas Flaring Management System: A Novel Tool for Sustainable Gas Flaring Reduction in Nigeria. *Applied Sciences*, 13(3), 1866–. <https://doi.org/10.3390/app13031866>

Perry, R.H., Green, D.W., & Maloney, J.O. (Eds.). (1997). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (7th Edition). McGraw-Hill.

Alhameedi, Smith, J. D., Ani, P., & Powley, T. (2022). Toward a Better Air-Assisted Flare Design for Safe and Efficient Operation during Purge Flow Conditions: Designing and Performance Testing. *ACS Omega*, 7(47), 42793–42800. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c04618>

American Petroleum Institute (s.f.) About API

<https://api.org/about>

Bader, Baukal, C., & Bussman, W. (2011). Selecting the proper flare systems. *Chemical Engineering Progress*, 107(7), 45–50.

Baukal Jr, C. E. (Ed.). (2013). *The John Zink Hamworthy Combustion Handbook: Volume 3—Applications*. CRC Press.

Bellovich, J., Franklin, J., & Baukal, C. (2006). The last line of defence. *Hydrocarbon engineering*, 11(4).

Bussman, W.R., and D. Knott. "Unique Concept for Noise and Radiation Reduction in High-Pressure Flaring." Paper presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, May 2000. doi: <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.4043/12160-MS>

Chen, F.F.K., Jentz, R.A., and D.G. Williams. "Flare System Design: A Case for Dynamic Simulation." Paper presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, May 1992. doi: <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.4043/6919-MS>

Cheremisinoff. (2013). *Industrial gas flaring practices*. Scrivener Pub.

Emam, E. A. (2016). Environmental pollution and measurement of gas flaring. *Int. j. innov. res. sci. eng. technol*, 2, 252-262.

Garzón Bejarano, C. P., & Amézquita Chaparro, D. H. (2013). Marco técnico como base para la reglamentación ambiental de las emisiones atmosféricas en la operación de las Teas en el sector de hidrocarburos. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/590.

Maarroof, Smith, J. D., & Zangana, M. H. S. (2023). Design and simulation of a utility oilfield flare in Iraq/Kurdistan region using CFD and API-521 methodology. *Heliyon*, 9(8), e18581–e18581. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18581>

Obawole, Adetunji B., Onwuka, Okechukwu C., Jan, Raymond J., Martin, Michael J., and Kevin P. McSorley. "Key Design Parameters for Smokeless Flaring of Low Pressure Gas." Paper presented at the SPE/EPA/DOE Exploration and Production Environmental Conference, San Antonio, Texas, February 2001. doi: <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.2118/66505-MS>

Pulido Duarte, H. (2016). Diseño de un sistema de elevación de una tea portátil para el quemado de gases de pozos petroleros de prueba (Bachelor's thesis, Fundación Universidad de América).

Sangsaraki, M. E., & Anajafi, E. (2015, January). Design criteria and simulation of flare gas recovery system. In *Proceedings of the International Conference on Chemical, Food and Environment Engineering (ICCFEE'15)*, Dubai, UAE (pp. 11-12).

Smith, Scot K., and Gary K. Selle. "Supersonic, High Pressure, Low Radiation Flare System Design." Paper presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, May 1997. doi: <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.4043/8503-MS>

The World Bank (s.f.). Global Gas Flaring Reduction Partnership

<https://bit.ly/3LYqZtJ>

Vásquez, H. (1994). La historia del petróleo en Colombia. Revista Universidad EAFIT, 30 (93), 99-109.

J. M. T. G. Kostiuk L, Et al. “Flare Research Project Final Report, November 1996 – September 2004”.