

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO
USFQ**

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Desarrollo de una metodología para el dimensionamiento de
mecheros encapsulados para una empresa ecuatoriana de
ingeniería y construcción en el sector Oil & Gas.**

Nelly Martina Mantilla Villena

Ingeniería Química

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
INGENIERA QUÍMICA

Quito, 10 de mayo de 2025

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO
USFQ**

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**Desarrollo de una metodología para el dimensionamiento de
mecheros encapsulados para una empresa ecuatoriana de
ingeniería y construcción en el sector Oil & Gas.**

Nelly Martina Mantilla Villena

Nombre del profesor, Título académico

Sebastián Ponce, Ph. D

Nombre del tutor de la Empresa, Título académico

Gabriel Llerena, Ing

Quito, 10 de mayo de 2025

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Nelly Martina Mantilla Villena

Código: 00321271

Cédula de identidad: 1724014566

Lugar y fecha: Quito, 10 de mayo de 2025

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>.

Resumen

Ecuador ocupa el puesto número 30 en explotación petrolera del mundo, sin embargo, es el diecisieteavo país con mayor intensidad de producción de gases de efecto invernadero asociados a la explotación petrolera y quema de gas asociado del mundo. La Fiscalía Ecuatoriana en 2021 ordenó que todas las empresas debían eliminar progresivamente sus sistemas de quema de gas tradicionales (mecheros elevados) y disminuir la producción de gases tóxicos hasta el 2030. Este proyecto busca atender la demanda de empresas petroleras que buscan mantener sus sistemas de quema de gas por distintas razones pero que también deben cumplir con las ordenanzas gubernamentales. Se desarrolló un programa y su respectivo manual de uso sustentado en un diagrama de decisiones, los dos anteriormente mencionados, basados en el método matemático de dimensionamiento de mecheros encapsulados que se desarrolló de igual forma en este proyecto. Dicho método y por ende, el programa, fue validado al tener menos del 10% de desviación en los resultados de dimensionamiento respecto a otros métodos externos. El dimensionamiento está basado en principios físicos, químicos y matemáticos como: la combustión de gases hidrocarburos; la transferencia de calor a través de superficies; la asistencia de oxígeno para procesos de combustión; la incidencia de geometrías, caudales y composiciones en el dimensionamiento de estructuras.

Palabras clave: mecheros encapsulados, quema de gas asociado al petróleo, gases de efecto invernadero, normativas de diseño y construcción, dimensionamiento.

Abstract

Ecuador ranks 30th in oil exploitation in the world, however, it is the seventeenth country with the highest intensity of greenhouse gas production associated with oil exploitation and associated gas flaring in the world. The Fiscalía Ecuatoriana in 2021 ordered all companies to phase out their traditional gas flaring systems (elevated flares) and reduce the production of toxic gases by 2030. This project seeks to meet the demand of oil companies that seek to maintain their gas flaring systems for various reasons but must also comply with governmental ordinances. A program and its respective user's manual were developed based on a decision diagram, the two previously mentioned, based on the mathematical method of sizing encapsulated flares that was developed in the same way in this project. This method, and therefore the program, was validated by having less than 10% deviation in the sizing results with respect to other external methods. The sizing is based on physical, chemical and mathematical principles such as combustion of hydrocarbon gases; heat transfer through surfaces; oxygen assistance for combustion processes; the incidence of geometries, flow rates and compositions in the sizing of structures.

Key words: enclosed-flame flares, associated petroleum gas combustion, greenhouse gas emissions, design and construction regulations, sizing.

Tabla de contenido

1. Introducción	10
1.1 Antecedentes	10
1.1.1 Extracción de petróleo.....	10
1.1.2 Obtención de gas asociado al petróleo como subproducto	10
1.1.3 Combustión de GAP	11
1.1.4 Clasificación de mecheros de combustión para gas asociado al petróleo.....	13
1.1.5 Normativas y estándares aplicables para la quema de GAP.....	14
1.2 Justificación	15
1.3 Objetivos.....	16
1.3.1 Objetivo General	16
1.3.2 Objetivos específicos	16
2. Metodología	17
2.1 Desarrollo del método matemático de dimensionamiento de mecheros encapsulados	17
2.1.1 Cálculo de suministro de aire en exceso para combustionar el GAP	17
2.1.2 Simulación en Hysys	18
2.1.3 Dimensionamiento cámara de combustión.....	19
2.1.4 Dimensionamiento refractario	22
2.1.5 Dimensionamiento barrera de viento (“Wind Fence”)	24
2.2 Uso del programa de dimensionamiento de mecheros encapsulados	25
2.2.1 Cálculo de refractario automático.....	28
2.2.2 Cálculo de refractario automático.....	30
3. Resultados.....	31
4. Conclusiones.....	36
5. Bibliografía	38
6. Anexos	45
ANEXO A: Cálculo mechero encapsulado simple automático usando el programa	45
ANEXO B: Manual de uso mechero encapsulado simple	49

Índice de tablas

Tabla 1. Límites de concentración definidos por el Código Orgánico del Ambiente (2018).....	18
Tabla 2. Criterio de relación para el caudal de GAP y la altura de la cámara de combustión.....	19
Tabla 3. Validación de método matemático para el pozo de flujo simple: P3EC1065A	32
Tabla 4. Validación de método matemático para el pozo de flujo simple: P3EC1065B	32
Tabla 5. Validación de método matemático para el pozo de flujo dual: P3EC1110I.....	33
Tabla 6. Validación de método matemático para el pozo de flujo dual: P3EC1110P	34

Índice de figuras

Figura 1. Mechero encapsulado P3EC1110I	31
-----------------------------------------------	----

1. Introducción

1.1 Antecedentes

1.1.1 Extracción de petróleo

La extracción de petróleo es aquel proceso que inicia con la perforación de pozos de desarrollo¹ en un campo de explotación, la recolección del petróleo que viene acompañado de gas asociado, la separación de estos dos fluidos por su diferente estado de materia, la deshidratación y estabilización del petróleo y, termina con la movilización del crudo a refinerías (Repsol S.A., 2022).

Ecuador ocupa el puesto número 30 en explotación petrolera del mundo, sin embargo, es el diecisieteavo país con mayor intensidad de producción de gases de efecto invernadero asociados a la explotación petrolera y quema de gas asociado del mundo (GGFR, 2024). Dentro del 61% del territorio amazónico en el país, que es utilizado en su totalidad por pozos petroleros, existe una densidad de 10.4 quemadores por kilómetro cuadrado, esta densidad es mayor que la que existe en biodiversidad en muchos lugares del mundo (Gabay, 2023).

1.1.2 Obtención de gas asociado al petróleo como subproducto

El gas asociado al petróleo (GAP) es aquel que se obtiene durante la extracción de petróleo. Aproximadamente, se puede extraer hasta 800[m³] de gas asociado por tonelada de petróleo. Este subproducto tiene un alto contenido de hidrocarburos, entre sus principales componentes: metano, etano, propano, butanos, pentanos y hexano (MWM Int., 2025), asimismo, tiene gases inertes como el dióxido de carbono y nitrógeno con

¹ Perforación que se realiza en un yacimiento petrolero con el objetivo de que sea un campo en producción

distintas composiciones dependiendo del yacimiento. La variabilidad en la cantidad y composición del GAP está sujeta al yacimiento del que fue obtenido, sin embargo, su comportamiento de combustión siempre está sujeto a fluctuaciones extremas.

El gas asociado se encuentra disuelto en el petróleo o como una capa de gas libre sobre el petróleo. Comúnmente, se extrae con la ayuda de unidades de separación, proceso que inicia con el ingreso del petróleo para pasar a los equipos que separan el gas, el agua y otras impurezas. El líquido se precipita y permanece en reposo mientras se escapa el gas atrapado, a su vez, el gas sale por la parte superior para pasar por un extractor de niebla que retira gotas de líquido de menor tamaño y el crudo se transporta a la refinería (Clemente et al., 2023).

Por lo general, el gas resultante es transportado y quemado en antorchas sin aprovechar el potencial energético que éste tiene. En Ecuador se quema 5[m³] por cada barril de petróleo extraído, significando un desperdicio de 58,5[kW-h], energía que puede ser utilizada en los mismos sistemas de extracción de petróleo ya sea para las líneas de explotación o para el tratamiento térmico de las aguas residuales que se producen en los campamentos² (Ayuso, 2017). El aprovechamiento de este subproducto no solo reduce costos para las empresas productoras de petróleo sino también trae consigo un gran impacto positivo en el medio ambiente disminuyendo la contaminación a través de la destrucción de compuestos tóxicos (Cusanguá-Cisneros et al., 2021).

1.1.3 Combustión de GAP

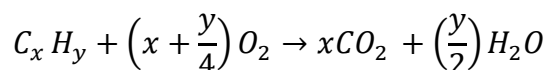
El proceso de combustión se da por la reacción de un combustible (hidrocarburos) con un comburente (oxígeno proveniente del aire) formando así dióxido de carbono, agua (vapor)

² Lugar donde se aloja el personal que trabaja en la explotación de petróleo y gas

y de esa forma libera energía. Existen dos tipos de combustión: completa e incompleta. La primera se caracteriza por darse cuando hay suficiente e incluso exceso de O_2 para oxidar todos los elementos del combustible; por producir dióxido de carbono y agua; y por liberar más energía. Mientras que, la segunda se caracteriza por darse cuando hay poco oxígeno y por eso produce dióxido de carbono, agua, pero también monóxido de carbono. La implicación ambiental por producir monóxido de carbono es negativa pues este compuesto tóxico contribuye a la formación de ozono, aumenta la contaminación y la existencia de gases como el metano y es altamente inflamable por lo que provoca humos tóxicos e incendios (Ismail & Umukoro, 2016). Debido a las consecuencias negativas de emitir este gas tóxico al medio ambiente, existen regulaciones emitidas en cada país sobre las concentraciones de este compuesto en los gases de escape de las antorchas.

A pesar de que, en este proyecto de titulación se busca asegurar combustión completa al suministrar un exceso de aire, no siempre se logra eliminar por completo el monóxido de carbono, pero si se asegura cumplir con las Normas Ministeriales de concentración, es por eso que se presenta a continuación la ecuación química balanceada de la combustión que servirá como guía más adelante:

Ecuación 1. Estequiometría de combustión de hidrocarburos



Donde “x” y “y” son definidos por el hidrocarburo a combustionar.

1.1.4 Clasificación de mecheros de combustión para gas asociado al petróleo

En la industria petrolera, se utilizan distintos equipos diseñados para quemar los gases asociados al petróleo. Como clasificación general se encuentran: mecheros elevados y mecheros encapsulados. Los mecheros elevados son aquellos que tienen la llama visible en la punta cuyas ventajas son: costos más bajos que otro tipo de mechero y diseños más sencillos. Por otro lado, sus desventajas recaen en que son visualmente más impactantes, tienen menor eficiencia de combustión y que no se puede asegurar la combustión completa del hidrocarburo sin el uso de equipos auxiliares, por ende, no se puede controlar ni el flujo ni la composición de los gases de escape (Clemente-Reyes et al., 2023a).

Un mechero encapsulado es un sistema de combustión donde el gas a quemar ingresa a una cámara cerrada revestida con material refractario, donde el flujo de gas es combustionado en uno o varios quemadores. Esta configuración mantiene la llama encerrada, reduciendo la visibilidad exterior y permitiendo un mayor control de la combustión, ya que se puede suministrar aire adicional para asegurar la combustión completa y minimizar contaminantes. El interior de la cámara garantiza un tiempo de residencia suficiente para destruir compuestos orgánicos, reducir emisiones de humo y cumplir con estándares ambientales internacionales que se indican en la sección 1.1.5 (API 537: 2017, 2020). A pesar de que en un inicio la implementación de mecheros encapsulados viene ligada con un costo operativo mayor, se vuelve una inversión atractiva a largo plazo. Las empresas petroleras no solo aprovechan los gases para generación de energía o vapor para sus procesos sino también los mecheros son de gran ayuda cuando por condiciones operativas del proceso principal se entra en un estado de emergencia, por

ejemplo, por la necesidad de aliviar presión en equipos de separación o cuando se apagan las unidades de generación. Asimismo, otra necesidad por parte de las petroleras para implementar los mecheros es que existen gases con características que no los hacen viables económicamente para generación eléctrica por lo que se prefiere quemarlos, pues no han podido ser aprovechados.

1.1.5 Normativas y estándares aplicables para la quema de GAP

Las industrias petroleras deben cumplir con ciertas normativas al momento de realizar la quema del gas obtenido de los yacimientos petroleros. A nivel nacional existen regulaciones establecidas por el Código Orgánico del Ambiente (2018). En cuanto a normativas internacionales existen estándares establecidos por API³ standard 521-Pressure-relieving and Depressuring Systems y API standard 537-Flare Details for Petroleum, Petrochemical, and Natural Gas Industries para diseño de sistemas de venteo y mecheros; y la EPA⁴-Flares para directrices en Estados Unidos. Los objetivos de estas normativas son regular la destrucción compuestos orgánicos volátiles (VOC); establecer límites de concentración para el CO, NO_x, SO₂, H₂S en la corriente de gas de escape y asegurar que el diseño de cámaras de combustión tome en cuenta una eficiencia de destrucción de contaminantes mayor al 98%.

El desarrollo de la metodología presentada en este proyecto se basa en las siguientes normativas: API 537 (2017), ASME STS-1 Steel Stacks (2017), EPA (1995), Código Orgánico del Ambiente (2018), más adelante, en las secciones respectivas, se indica las normativas utilizadas para cada base de diseño.

³ American Petroleum Institute

⁴ Environmental Protection Agency: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos

1.2 Justificación

A pesar de que, desde 1970 el gobierno viene aplicando medidas y leyes para prevenir en gran parte el impacto ambiental y social de la explotación y traslado del crudo, el manejo y la quema de gas asociado se ha dejado completamente de lado hasta que un grupo de mujeres de la provincia de Sucumbíos, conocidas como las “Guerreras del Amazonas”, presentaron una denuncia en Fiscalía en 2021. Misma que terminó en que este organismo falle ante el grupo de mujeres y ordene al estado ecuatoriano que todas las empresas tanto públicas como privadas eliminen progresivamente sus sistemas de quema de gas tradicionales (mecheros elevados) y disminuyan la producción de gases tóxicos hasta el 2030 (Juicio No: 21201202000170, 2021).

Los mecheros de quema utilizados actualmente en el país cuentan en su mayoría con una antorcha de mecha elevada. En teoría esta medida debería disminuir la cantidad de gases contaminantes inhalados por los pueblos aledaños, sin embargo, al tener una densidad tan intensa de quemadores, las poblaciones amazónicas no están libres de las consecuencias negativas en su salud. Ecuador está por detrás de países latinos como Colombia y México en términos de “limpieza en la explotación”, estos países ya han comenzado a cambiar sus mecheros y de esta manera han disminuido la emisión de gases tóxicos hasta en un 30%, sin mencionar también los beneficios económicos que esta transición conlleva.

Las nuevas ordenanzas gubernamentales no afectan solo a empresas petroleras, pues éstas buscan cumplir con las normativas, pero también tienen interés de mantener sistemas de combustión de gases por emergencias en los procesos principales o por quema de gases que no se pueden aprovechar. Sino también se ven implicados los contratistas asociados a la industria, lo que se vio reflejado en un aumento en la demanda de compañías EPC⁵

⁵ Empresa que se encarga de la ingeniería, compra y construcción de proyectos

para atender estos cambios imperativos hasta el final de la década. Al no haber un precedente en el país para el diseño de mecheros encapsulados, la empresa SCMI Inc, ha tenido que acudir a terceros para el dimensionamiento de mecheros encapsulados en diversos procesos de licitación para las empresas operadoras de campos petroleros del país. La falta de experiencia en el diseño de estos equipos ha llevado a que el desarrollo sea completamente realizado por empresas subcontratistas, sin que SCMI Inc, cuente con un criterio que permita validar estos diseños tanto en la etapa de licitación como en la etapa de diseño. Subsecuente ha concluido en el problema central que es: incurrencia en costos fuera del presupuesto por un dimensionamiento inapropiado durante la etapa de licitación, problemas operativos, diseños menos eficientes.

Es por esto que, la empresa de ingeniería y construcción se ha planteado un proyecto para desarrollar una metodología interna para el dimensionamiento de mecheros encapsulados para atender la demanda a raíz de las nuevas condiciones gubernamentales. De esta manera, la empresa tendría la posibilidad de asegurar el suministro e instalación de mecheros encapsulados que cumplan las leyes ambientales con eficiencia técnica y económica.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar una metodología para el dimensionamiento de mecheros encapsulados en una empresa de ingeniería y construcción en el sector Oil & Gas.

1.3.2 Objetivos específicos

1.3.2.1 Elaborar un método matemático para el dimensionamiento de mecheros encapsulados

1.3.2.2 Desarrollar un programa que permita el dimensionamiento de mecheros encapsulados basado en el método matemático

1.3.2.3 Elaborar un manual de uso del programa que siga un diagrama de decisiones fundamentado

2. Metodología

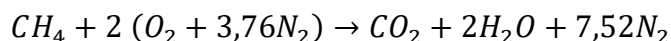
2.1 Desarrollo del método matemático de dimensionamiento de mecheros encapsulados

2.1.1 Cálculo de suministro de aire en exceso para combustionar el GAP

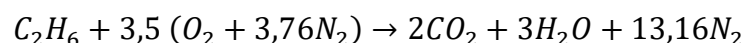
El método de dimensionamiento se basa en el caudal y composición del gas asociado al petróleo (GAP) que se va a combustionar. Para poder empezar el cálculo de las dimensiones tanto de la cámara de combustión, el refractario y la barrera de viento (“wind fence”) se deben ingresar las condiciones y composiciones tanto del GAP como del aire ambiental propias del campo.

En primera instancia, se calculará el caudal de aire en exceso necesario para combustionar el GAP. Para esto se recomienda suministrar entre 15% a 25% de aire en exceso, por lo general, es un valor que asegura la combustión completa de los hidrocarburos; sin embargo, hay ocasiones en las que se puede llegar a suministrar hasta un 200%, valor que depende de la composición del GAP (Cala et al., 2013). Una vez definido el porcentaje de aire en exceso se calcula estequiométricamente el caudal de aire que se va a suministrar siguiendo las siguientes ecuaciones balanceadas:

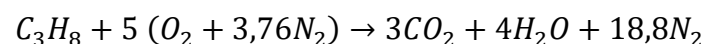
Ecuación 2. Ecuación de combustión de metano balanceada



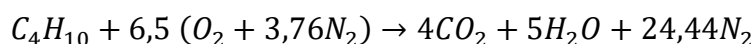
Ecuación 3. Ecuación de combustión de etano balanceada



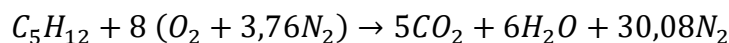
Ecuación 4. Ecuación de combustión de propano balanceada



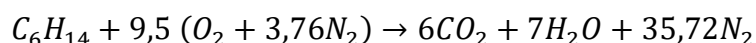
Ecuación 5. Ecuación de combustión de butano balanceada



Ecuación 6. Ecuación de combustión de pentano balanceada



Ecuación 7. Ecuación de combustión de hexano balanceada



2.1.2 Simulación en Hysys

Con la ayuda del software de simulación “ASPEN Hysys” se simula la reacción entre el GAP y el aire en un “reactor Gibbs”, equipo que busca encontrar el estado de equilibrio con la menor energía libre de Gibbs, es por esto que fue seleccionado pues siguiendo ese principio calcula las composiciones de la corriente de salida de este sistema ideal que sería la combustión de hidrocarburos (Solsvik et al., 2016). Para la simulación se usa el paquete termodinámico “Peng-Robinson” ideal para este proyecto pues describe con bastante precisión el comportamiento de sistemas implicados con hidrocarburos al tomar en cuenta las interacciones binarias existentes en las reacciones.

Una vez corrida la simulación es necesario obtener las condiciones y composiciones de la corriente de salida con el objetivo de asegurarse que se dio una combustión completa (al haber presencia de oxígeno) y verificar que los gases emitidos cumplen con las normas ministeriales. Los límites de concentración permitidos según el Código Orgánico del Ambiente (2018) son:

Tabla 1. Límites de concentración definidos por el código orgánico del ambiente (2018)

Compuesto	Límite de concentración [mg/Nm ³]
CO	196
NO _x	796
SO ₂	57

HAPs ⁶	0,1
COVs ⁷	2

Es importante tomar en cuenta que estas concentraciones están definidas en base a un 7% de oxígeno por lo que se debe hacer una corrección en base al oxígeno obtenido después de la combustión del GAP para poder conocer el valor de la concentración de cada compuesto y poder compararlos con los de la tabla 1.

2.1.3 Dimensionamiento cámara de combustión

Una vez conocida la corriente de salida, se procede a dimensionar la cámara de combustión, en el que se debe asignar un valor a la altura de la cámara siguiendo la siguiente relación con el caudal de GAP:

Tabla 2. Criterio de relación para el caudal de GAP y la altura de la cámara de combustión

Caudal de GAP a combustionar [MMSCFD]	Altura cámara de combustión [m]
0 a 0,5	9,75
0,6 a 1	11
1,1 a 2	12,25
2,1 a 5	14,5
5,1 a 9	17

Esta relación fue obtenida al realizar un análisis de sensibilidad para varios caudales. Los valores de la altura corresponden, para mayor facilidad constructiva, a múltiplos de 8ft para optimizar el uso del material de las planchas de acero que son producidas con esta longitud. Es importante, verificar que una vez colocado el valor de la altura se cumpla con la primera advertencia que menciona que la máxima velocidad permitida para la

⁶ HAPs: C₁₄H₁₀, C₂₀H₁₂, C₁₈H₁₂

⁷ COVs: C₆H₆, C₆H₄(CH₃)₂, C₇H₈, C₈H₁₀

salida de los gases es 18,3 m/s (ASME STS-1, 2016) y en el caso de no cumplir se varía la altura unos decimales hasta alcanzar el objetivo.

Se empieza el cálculo buscando conocer el caudal dentro de la cámara de combustión con la ayuda de la ecuación de gases ideales, pero relacionando a través de la presión y la temperatura al caudal volumétrico como se presenta a continuación:

Ecuación 8. Ley de gases ideales

$$\frac{P1 * Q1}{T1} = \frac{P2 * Q2}{T2}$$

La ecuación 8 es una relación conservadora entre el punto 1 (afuera de la cámara de combustión) y el punto 2 (dentro de la cámara de combustión). Donde:

- P es la presión del ambiente donde se encuentra el pozo [atm]
- Q es el caudal [m³/h] en el que $Q1$ fue obtenido por Hysys y se busca $Q2$
- T es la temperatura [K] en la que $T1$ es 975°C valor que se usa para residuos peligrosos halogenados (DIRECTIVA 2000/76/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 4 de Diciembre de 2000 Relativa a La Incineración de Residuos, 2000) y $T2$ es la temperatura ambiental

Una vez obtenido el valor de $Q2$ se busca el diámetro incluido en el área A sabiendo la altura que se asignó anteriormente, para esto se utiliza la fórmula de “efecto chimenea” que se usa para estimar el caudal de gases que ascienden de manera natural en una columna vertical debido a la diferencia de densidades (que se da por las temperaturas diferentes) entre el fluido interno y el ambiente:

Ecuación 9. Efecto chimenea

$$Q2 = C * A * \sqrt{2 * g * h * \frac{Te - Ta}{Te}}$$

Donde:

- Q_2 es el caudal obtenido en la ecuación 8 [m^3/h]
- c es el coeficiente de descarga (valor que se obtiene de la cromatografía y mientras más alto mejor eficiencia tendrá el fluido para transportarse por un orificio)
- g es la gravedad [m/s]
- h es la altura de la cámara de combustión [m]
- T_e es la temperatura de los gases dentro de la cámara [K]
- T_a la temperatura ambiental [K]

Una vez obtenido el diámetro se calcula el volumen geométrico con la formula general de un cilindro (V_2) y se calcula el volumen 1 simultáneamente con la siguiente fórmula:

Ecuación 10. Volumen calculado por gasto térmico

$$V_1 = \frac{\text{calor de combustión}}{\text{emisión de calor volumétrica}}$$

Donde:

- *Calor de combustión* [kcal/h] se obtiene al multiplicar el caudal de GAP [lb/h] por el LHV que se obtiene de la cromatografía del gas y la pérdida de calor (0,8 que es el valor que se asume como factor de diseño)
- *Emisión de calor volumétrica* [kcal/h/m^3] es un valor de 310 [kW/m^3] (266553,5 [kcal/h/m^3]) que indica la API 537 que se debe mantener fijo para este tipo de mecheros

Una vez obtenidos los dos volúmenes, tanto el geométrico como el térmico, se procede a iterar el diámetro obtenido anteriormente hasta que el volumen geométrico (*volumen 2*) sea mayor al volumen térmico (*volumen 1*) pero sin exceder el 10% de desviación pues es el límite máximo permitido para considerar que dos valores obtenidos por métodos diferentes están relacionados entre sí (Green & Southard, 2019).

2.1.4 Dimensionamiento refractario

Para el dimensionamiento del refractario se busca calcular el coeficiente total de transferencia de calor tanto universal como el de conducción para poder iterar el espesor. En esta parte se define la temperatura de la pared externa (expuesta al ambiente) y en base a eso se modifica el espesor del refractario para poder alcanzar esa temperatura T_p . La temperatura T_p que se define puede ser la requerida por el usuario o se puede utilizar el valor recomendado por la norma ISO 13732-1 de 80[°C] en el caso de no tener una específica por el cliente, pues es una temperatura de seguridad que considera el contacto directo del personal con el equipo. Dicho esto, se calcula el calor transferido por conducción, convección y radiación:

Ecuación 11. Conductividad Térmica

$$hb = \frac{2 * \pi * K_{ref}}{\ln \frac{D_o}{D_i} * D_o}$$

Donde la *conductividad térmica* [W/k*m2] se calcula con:

- K_{ref} [W/mK] que es el coeficiente de conductividad propio del material del refractario
- D_o es el diámetro externo del refractario [m]
- D_i es el diámetro interno del refractario [m]

En este tipo de transporte de calor se toma en cuenta las 3 capas de refractario que el método permite pues se incluye en el cálculo los tres coeficientes de conductividad que cada material podría tener y en cascada se calcula el calor por conducción de cada capa para tener un valor total.

Ecuación 12. Convección Natural

$$hc = 5,7 + 3,8v$$

Donde el *calor por convección* [W/m²°C] utiliza la:

- *velocidad del viento* donde se encuentra la cámara de combustión en [m/s]

Ecuación 13. Radiación

$$hr = \frac{0,173 * \varepsilon * \left[\left(\frac{T_p}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_o}{100} \right)^4 \right]}{T_p - T_o}$$

Donde el *calor por radiación* en [Btu/h*m²*F] se calcula con:

- ε es el coeficiente de emisividad cuyo valor es 0,9 siempre pues se utiliza acero para hacer la cámara de combustión
- T_p es la temperatura de la pared a la que se desea llegar [R]
- T_o es la temperatura ambiente [R]

Una vez con estas tres ecuaciones se obtiene:

Ecuación 14. Coeficiente Total de Transferencia de Calor

$$\frac{1}{h} = \frac{1}{h_b} + \frac{1}{h_r + h_c}$$

Donde h [W/m²K] por lo que el resto de los tipos de transporte de calor deben estar en las mismas unidades para poder realizar la suma. Con esta ecuación se puede calcular el calor transferido por el refractario con:

Ecuación 15. Transferencia de Calor

$$q1 = A * h * \Delta T$$

En el que $q1$ [W] se calcula a partir de:

- A que es el área transversal de la cámara de combustión donde el *diámetro externo* del refractario [m] es el que estamos iterando y la *altura* que se deja fijo como valor de 2[m] que Y. Zhang & Luo (2024) recomienda como factor de diseño para valor común de una llama de combustión de hidrocarburos

- h [W/m²K] como coeficiente total de transferencia de calor
- diferencia de la *temperatura de la llama* [K] y la temperatura ambiente (T_o) [K].

Como se puede ver $q1$ es calculado con el coeficiente total de transferencia de calor, pero $q2$ [W] se calcula con el coeficiente de transferencia de calor por conducción donde únicamente cambia h por h_b y la diferencia de temperatura se da *temperatura de la llama* [K] y la temperatura externa a la que se quiere llegar (T_p) [K].:

Ecuación 16. coeficiente de transferencia de calor por conducción

$$q2 = A * h_b * \Delta T$$

Una vez obtenido $q1$ y $q2$ se va iterando el diámetro (espesor) del refractario, manteniendo la temperatura de la pared externa que se fijó en un inicio, hasta que $q2$ y $q1$ sea mayor con una desviación máxima del 10% esto ya que de esa forma se asegura que el calor por conducción es mayor al calor total con lo que se puede afirmar que se está llegando a la temperatura de la pared deseada con equis espesor. Es importante una vez definido el espesor verificar que la relación altura cámara de combustión y diámetro incluido refractario cumpla con los límites de esbeltez permitidos que van entre un valor de 3 a 5 (Stone et al., 1995).

2.1.5 Dimensionamiento barrera de viento (“Wind Fence”)

Para el dimensionamiento de la barrera para el viento se calculan 3 áreas diferentes: área necesaria para asegurar el suministro de aire requerido para la combustión del GAP (calculado en la sección 2.1.1), el *área geométrica* y el *área disponible*:

Ecuación 17. Flujo másico

$$Q = A_n * \rho * v$$

Con la ecuación 17 se obtiene el área necesaria (A_n) para suministrar el aire requerido [m²] la cual utiliza:

- caudal del aire calculado en la sección 2.1.1 [kg/s]

- densidad del aire (ρ) [kg/m³]. Se debe colocar la densidad del aire a la temperatura máxima ambiente con el fin de asegurar el cálculo para la mayor área necesaria
- velocidad del aire (v) [m/s]

Ecuación 18. Área de un círculo

$$Ag = \pi * \frac{d^2}{4}$$

Con la ecuación 18 se busca calcular el área geométrica (Ag) disponible [m²] de esa forma se empieza el cálculo con el diámetro [m] obtenido de la cámara de combustión incluida el refractario, pero se va sumando mm hasta que el *área disponible* sea mayor al *área necesaria* modificando el diámetro del área geométrica. El área disponible se obtiene al restar el *área geométrica* menos el *área cubierta* por dampers o plataformas. De igual forma la variación entre el área disponible siendo mayor al área necesaria no puede ser mayor al 10%. De esta forma se itera el diámetro hasta obtener el valor y la altura del “wind fence” se mantiene en un valor de 2m pues corresponde a la altura promedio de una persona en el mundo por lo que se mantiene las normas de seguridad para mantener a personas alejadas de la cámara de combustión.

2.2 Uso del programa de dimensionamiento de mecheros encapsulados

El programa de dimensionamiento de mecheros encapsulados se realizó en Microsoft Excel con la ayuda del lenguaje de programación Visual Basic for Applications (VBA) con el que se pudo automatizar funciones a través de macros para que el uso del programa sea más eficiente. El programa está basado siguiendo el método de dimensionamiento explicado en la sección 2.1.

Antes de empezar a utilizar el programa es importante tomar en cuenta la siguiente información general: dentro de una misma hoja el flujo del programa está dirigido por flechas delgadas azules unidireccionales y en distintas hojas el flujo del programa está

dirigido por flechas gruesas azules (apuntan a la izquierda para retroceder una página anterior o a la derecha si se desea dirigir a la siguiente página). Todos los ambientes del programa manejan el mismo código de colores que se detallan al inicio de cada hoja.

Al ingresar al “Programa de dimensionamiento” dirigirse a la hoja “P” donde se debe seleccionar si el programa va a ser para: una corriente de gas asociado⁸ (simple) o para dos corrientes de gas asociado (dual). Una vez en la hoja “S0” o “D0” se deben ingresar los datos de entrada tanto para la corriente del gas asociado como para el aire (cuyas condiciones son las ambientales). Las condiciones de operación y ambientales corresponden a cada locación. La composición, la densidad y el poder calorífico inferior (LHV) del gas asociado se encuentran en su respectiva cromatografía. En el caso de que en la cromatografía del gas asociado haya hidrocarburos con más de seis carbonos (por ejemplo: heptanos u octanos) se debe sumar el porcentaje molar de esos hidrocarburos al porcentaje molar del hexano. Al deslizar hacia abajo la hoja se encontrará el “paso 1” en el que únicamente se debe ingresar el valor de aire en exceso que se va a suministrar como porcentaje. Se recomienda que al menos se ponga 15% de exceso, este es el valor común en el que se logra la combustión casi completa. El programa realizará el cálculo estequiométrico para obtener el caudal de aire necesario y en exceso para combustionar el gas con las condiciones y composiciones que anteriormente se ingresaron a través de las ecuaciones (2, 3, 4, 5, 6 y 7) presentadas en la sección 2.1

Una vez ubicados en la hoja “S1” o “D1”, se debe ingresar al software de simulación “Hysys”, abrir el archivo “Simple” o “Dual” según corresponda. En el ambiente de “simulación” hacer click en la corriente “GAP” y colocar los datos de las tablas: “Condiciones gas asociado” y “Composición gas asociado”; luego hacer click en la

⁸ Gas asociado al petróleo que será combustionado en el mechero encapsulado.

corriente “Aire” y colocar los datos de la tabla: “Condiciones aire”. No se debe ingresar los datos de la tabla “Composición de aire” pues ya están ingresados en el archivo al ser constantes. Una vez corrida la simulación, entrar a la corriente “Gas de escape” y anotar los valores arrojados para llenar la tabla “Condiciones gas de escape” y “Composición gas de escape”. El programa no le permitirá avanzar en el caso de que el valor en la composición de oxígeno ingresado sea menor o igual a 0,0000. Debe ser mayor pues es la única forma de asegurar que se está suministrando aire en exceso, en este caso debe regresar a la página “S0” o “D0” y aumentar el % de aire en exceso en la tabla “Aire en exceso” hasta que la fracción molar de oxígeno a la salida en la simulación sea mayor a 0,0000. Finalmente, en esta hoja “S1” o “D1”, el programa hace el cálculo de concentración de cada componente en $[\text{mg}/\text{Nm}^3]$ que se muestra en la tabla “Composición gas de escape” en celdas celestes. La hoja de cálculo está configurada para mostrar una advertencia en el caso de que la concentración de monóxido de carbono exceda el valor de 196 $[\text{mg}/\text{Nm}^3]$, valor establecido por el Código Orgánico del Ambiente (2018) que corrige las concentraciones al 7% de oxígeno en exceso⁹.

En la hoja “S2” o “D2” se debe empezar por ingresar el valor de la altura de la cámara de combustión siguiendo el criterio que relaciona el caudal de GAP y la altura de la cámara de combustión mostrado en la tabla 2. Verificar que una vez colocado el valor de la altura se cumpla con la primera advertencia tomate que menciona “Máxima velocidad permitida por la ASME es 18,3 m/s”. En el caso de no cumplir se varía la altura unos decimales hasta alcanzar el objetivo. Posteriormente, se procede a modificar la celda verde “d” para sumar equis valor a la celda blanca “d”. El objetivo es iterar el diámetro hasta cumplir con la segunda advertencia tomate que menciona “Este valor debe ser entre 0 y 10”, esta

⁹ Para mayor detalle de cálculos y fundamentos teóricos ver el documento “Trabajo de titulación” en la sección metodología

advertencia está relacionada con los volúmenes 1 y 2, en el que el volumen 2 que representa a la geometría de la cámara debe ser mayor al volumen 1 que es el necesario para la combustión.

En esta sección, en la hoja “S2” o “D2”, se debe escoger entre las dos opciones de cálculo de refractario:

- Automático: esta opción de dimensionamiento ofrece al usuario escoger el tipo de material del que estaría hecho el refractario, la densidad que tendría y con eso asigna un valor de conductividad térmica. Tiene una red amplia de opciones y a partir de ese valor se haría el dimensionamiento.
- Manual: en esta opción el usuario debe colocar manualmente el valor de conductividad térmica. Se utiliza esta opción en caso de no haber encontrado el material o la densidad deseada en la opción “automática de dimensionamiento”.

2.2.1 Cálculo de refractario automático

Una vez seleccionado el botón “automático” te dirigirá a la hoja “S2.1” o “D2.1”. En la tabla “datos de entrada” colocar la temperatura en [K] a la que se quiere llegar en la pared externa del mechero, una vez colocado el refractario. Si no hay un valor en específico se recomienda colocar 353,15[K] que es lo que dicta la norma ISO 13732-1 como valor seguro para el contacto inesperado del personal con el equipo de acero. En las tablas “capa 1”, “capa 2”, “capa 3” se debe seleccionar la “temperatura de clasificación¹⁰”, “densidad” y “temperatura¹¹” en ese orden. Si en la celda de conductividad térmica sale “#N/D” es porque la “densidad” o “temperatura⁴” no están bien seleccionadas en las opciones existentes. Si en la celda de conductividad térmica sale “no” es porque el catálogo no

¹⁰ Temperatura más alta en el que la contracción del material no supera el límite especificado

¹¹ Temperatura de operación, seleccionar la temperatura igual o mayor a la temperatura indicada en la celda “Temperatura de la llama (°F)”

ofrece un valor para esas condiciones. En los dos casos se debe escoger otra “temperatura de clasificación³”, “densidad” o “temperatura⁴” pues siempre debe haber un valor de conductividad para hacer el dimensionamiento. Por otro lado, en las tablas “capa 1 hb”, “capa 2 hb”, “capa 3 hb” se debe modificar la celda verde “Do” y sumar el espesor deseado en [mm] para cada capa. Es importante mantener en todo momento las 3 capas. Por ejemplo, si se desea un solo material de 900mm de espesor se deberá colocar de igual forma el mismo material en las tres tablas y en cada capa sumar 300mm para poder llegar al espesor deseado. De igual forma proceder si solo se desean dos materiales, se debe repartir el espesor en las 3 capas y que dos de ellas sean del material A y la otra capa del material B. Finalmente, en la tercera sección se debe llenar la celda verde “Tp iterado” con el mismo valor o menor que el declarado en la celda “Temperatura de la pared externa a la que se desea llegar” no puede ser mayor pues es el que se definió para todo el cálculo y puede ser el requerido por el cliente o por norma. Una vez con la celda “Tp iterado” llena, el objetivo es cumplir con la advertencia “Este valor debe ser entre 0 y 10” y para eso se deberá aumentar o disminuir el espesor en las capas (ya sea en solo 1, 2 o las 3) dependiendo de la decisión del usuario.

Una vez en la hoja “S3” o “D3” dirigirse a la sección de la izquierda. Modificar la celda verde “Diametro wind fence” e ir sumando poco a poco hasta cumplir con la advertencia “Este valor debe ser entre 0 y 10” pues de esa forma aseguramos que el área del wind fence disponible es mayor al área necesaria para suministrar el aire durante la combustión. Se ha definido un valor de 2,8[m²] para “Área cubierta (plataformas)” que es un valor antes utilizado para representar el área cubierta por plataformas o dampers pero puede ser modificado según necesidad del usuario.

Finalmente, una vez en la hoja “S4” o “D4” dirigirse a la sección de la izquierda. Visualizar las dimensiones finales que se muestran en las tablas con encabezados celestes, una vez acabado el cálculo puede:

- a. Guardar el archivo de Excel con los resultados obtenidos: (aplastar el botón de la izquierda). Esta opción guardará únicamente las hojas correspondientes en formato xls.
- b. Borrar información de entrada: lo que eliminará los cálculos de forma permanente desde la hoja “S0” o “D0” según corresponda
- c. Volver a la página principal: pero de todas formas los cálculos quedarán guardados y registrados y se podrá empezar de nuevo desde el inicio, pero las celdas estarán llenas.

2.2.2 Cálculo de refractario automático

En cambio, si se desea el cálculo del refractario “manual” el programa te dirigirá a la hoja “S2.2” o “D2.2”. Se debe proceder de igual forma que como se detalló para el refractario “automático” solo que en las tablas “capa 1 hb”, “capa 2 hb”, “capa 3 hb” se debe llenar también la celda “Kref (W/mK)” con el coeficiente de conductividad térmica que desee el usuario.

Una vez en la hoja “S3” o “D3” dirigirse a la sección de la derecha. Modificar la celda verde “Diametro wind fence” e ir sumando poco a poco hasta cumplir con la advertencia “Este valor debe ser entre 0 y 10” pues de esa forma aseguramos que el área del wind fence disponible es mayor al área necesaria para suministrar el aire durante la combustión. Se ha definido un valor de $2,8[m^2]$ para “Área cubierta (plataformas)” que es un valor antes utilizado para representar el área cubierta por plataformas o dampers pero puede ser modificado según necesidad del usuario.

Finalmente, una vez en la hoja “S4” o “D4” dirigirse a la sección de la derecha. Visualizar las dimensiones finales que se muestran en las tablas con encabezados celestes, una vez acabado el cálculo puede:

- d. Guardar el archivo de Excel con los resultados obtenidos: (aplastar el botón de la derecha). Esta opción guardará únicamente las hojas correspondientes en formato xls.
- e. Borrar información de entrada: lo que eliminará los cálculos de forma permanente desde la hoja “S0” o “D0” según corresponda
- f. Volver a la página principal: pero de todas formas los cálculos quedarán guardados y registrados y se podrá empezar de nuevo desde el inicio, pero las celdas estarán llenas.

3. Resultados

Para poder mejorar la comprensión del usuario se realizó una figura 3D con la ayuda del software de diseño SketchUp en la que se pueda visualizar las estructuras dimensionadas en este proyecto:

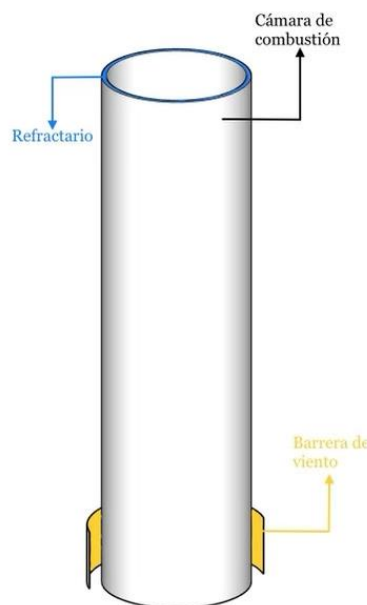


Figura 1. Mechero encapsulado P3EC1110I

Como estructura blanca/gris se tiene la cámara de combustión, como estructura azul se tiene el refractario y como estructura amarilla se tiene la barrera para el viento. La figura 1 está hecha a escala utilizando las medidas obtenidas por el dimensionamiento desarrollado en este proyecto para el pozo petrolero P3EC1110I cuyo equipo es dual.

Tras desarrollar el método matemático se realizó su validación. Para validar los resultados del método de cálculo desarrollado se realizó una comparación de los resultados obtenidos aplicando este método para dimensionar 4 mecheros encapsulados y compararlos con las dimensiones obtenidas por una compañía externa durante el desarrollo de proyectos anteriores.

La comparación de resultados para dos de los campos, pertenecientes al proyecto P3EC1065, se muestra a continuación:

Tabla 3. Validación de método matemático para el pozo de flujo simple: P3EC1065A

P3EC1065A					
Equipo	Parámetros	Método desarrollado	Método externo	Unidades	Error porcentual [%]
Cámara de combustión	Diámetro interno	2,13	2,02	m	5,45
	Altura	10,75	12,00	m	10,02
	Volumen interno	38,31	38,46	m ³	0,40
Refractario	Espesor	0,127	0,076	m	67,11

Tabla 4. Validación de método matemático para el pozo de flujo simple: P3EC1065B

P3EC1065B					
Equipo	Parámetros	Método desarrollado	Método externo	Unidades	Error porcentual [%]
Cámara de combustión	Diámetro interno	1,63	1,70	m	4,12
	Altura	9,75	10,70	m	8,88
	Volumen interno	20,35	24,29	m ³	19,37
Refractario	Espesor	0,127	0,076	m	67,11

El proyecto P3EC1065 tiene mecheros en dos campos distintos, con GAP de distinta composición y flujo por lo que son dos diferentes cámaras de combustión simples (A y B). Para este pozo no se solicitó el dimensionamiento de la barrera de viento por lo que a pesar de que si se dimensionó con el método desarrollado no se colocó en la comparación de tablas pues no había resultados proporcionados por el método externo.

Sin embargo, se puede observar tanto en la tabla 3 como la tabla 4 que la desviación de los resultados de diámetro y altura de la cámara no superan el 10% por lo que se considera que los dos valores están relacionados entre sí y se valida el método matemático para equipos simples (una sola corriente de GAP) (Green & Southard, 2019).

Los dos métodos obtuvieron sus resultados para el espesor de los refractarios de material “ceramic fiber” y como temperatura deseada de la pared externa 176°F, es importante haber mantenido constante estos aspectos para que la comparación del método sea certera. Se puede ver que en las tablas el error porcentual del refractario es alto y esto se debe a que el valor del coeficiente de conductividad del material para los cálculos tercerizados es desconocido y el utilizado en este proyecto es obtenido del fabricante del refractario, valor que varía dependiendo del mismo utilizado. Sin embargo, no existe impacto en la validación pues el volumen final (volumen externo) de la cámara de combustión incluido refractario no supera el 10%.

Para la validación de los equipos duales se realizó el dimensionamiento para dos pozos petroleros: P3EC1110I y P3EC1110P. Sus resultados se muestran a continuación:

Tabla 5. Validación de método matemático para el pozo de flujo dual:
P3EC1110I

P3EC1110I					
Equipo	Parámetros	Método desarrollado	Método externo	Unidades	Error porcentual [%]
Cámara de combustión	Diámetro interno	4,72	4,64	m	1,72
	Altura	18,00	18,29	m	1,59

	Volumen interno	314,95	309,27	m ³	1,80
Refractario	Espesor	0,127	0,076	m	67,11
Barrera de viento	Área dampers	5,00	4,87	m ²	2,67

Tabla 6. Validación de método matemático para el pozo de flujo dual: P3EC1110P

P3EC1110P					
Equipo	Parámetros	Método desarrollado	Método externo	Unidades	Error porcentual [%]
Cámara de combustión	Diámetro interno	2,52	2,44	m	3,28
	Altura	12,25	12,19	m	0,49
	Volumen interno	61,10	57,00	m ³	6,71
Refractario	Espesor	0,127	0,076	m	67,11
Barrera de viento	Área dampers	4,50	4,87	m ²	7,60

Para estos pozos si se solicitó el dimensionamiento de la barrera de viento por lo que en las tablas 5 y 6 se incluyen los cálculos para la barrera de viento. Se puede observar en las dos tablas respectivas que la desviación de los resultados para el diámetro y altura de la cámara no supera el 10% por lo que se considera que los dos valores están relacionados entre sí y se valida el método matemático para equipos duales (dos corrientes de GAP en cada equipo).

Los dos métodos obtuvieron sus resultados con refractarios de material “ceramic fiber” y como temperatura deseada de la pared externa 176°F, es importante haber mantenido constante estos aspectos para que la comparación del método sea certera. Se puede ver que en las tablas el error porcentual del refractario es alto y esto se debe a que el valor del coeficiente de conductividad del material para los cálculos tercerizados es desconocido y el utilizado en este proyecto es obtenido del fabricante del refractario, valor que varía dependiendo del mismo utilizado. Sin embargo, no existe impacto en la validación pues

el volumen final (volumen externo) de la cámara de combustión incluido refractario no supera el 10%.

Por otro lado, se pueden ver en las dos tablas los cálculos para la barrera de viento o “wind fence” que de igual forma los errores entre los dos métodos no superan el 10% por lo que se puede afirmar que los cálculos para realizar el dimensionamiento de la barrera de viento son correctos y están relacionados a los cálculos proporcionados por otros métodos. A pesar de que, el método desarrollado en este proyecto no calcula directamente el área de los dampers, si calcula el área disponible entre el wind fence y la cámara de combustión por lo que de esa forma se puede calcular el área cubierta por los dampers [m^2] y por ende, poder comparar los resultados con los provistos por otros métodos externos.

A pesar de que, como se mencionó anteriormente, los métodos están relacionados entre sí pues se desviación es menor al 10% se puede ver en las tablas 3, 4, 5 y 6 que si tienen diferencias entre sí. Estas diferencias presentadas en los resultados, tanto para el dimensionamiento de la cámara de combustión con el refractario como para el dimensionamiento de la barrera de viento, pueden deberse a que el método desarrollado en este proyecto toma en cuenta ciertas normas que el los métodos externos no como que los gases de escape deben salir máximo a 18,3 [m/s] según la ASME STS-1 (2016) o que no siguen la norma de esbeltez en la que la relación altura versus diámetro de la cámara de combustión debe estar entre 3 a 5 siguiendo lo que dicta la EPA (1995). En los dos casos, estas dos normas que este método matemático exige cumplir para proceder con los cálculos están directamente relacionadas a la altura y diámetro de la cámara de combustión incluido el refractario por lo que incide determinantemente en los resultados finales de dimensionamiento.

En los anexos A y B respectivamente se puede observar un ejemplo del uso del programa para un dimensionamiento de un mechero encapsulado simple y el manual de uso del programa para un mechero con la misma configuración.

4. Conclusiones

En este proyecto se pudo desarrollar una metodología para el dimensionamiento de mecheros encapsulados para la empresa ecuatoriana de ingeniería y construcción en el sector Oil & Gas- SCMI Inc. Con este trabajo de investigación se buscaba afrontar la necesidad de un método matemático de dimensionamiento que agilice la estimación del costo del envolvente metálico y del material refractario durante el proceso de licitación y mejore el tiempo de desarrollo del diseño durante la etapa de ejecución y; de esta manera atender la demanda de mecheros encapsulados a raíz de las nuevas condiciones gubernamentales y la necesidad de las empresas petroleras a mantener sistemas de quema de gas. De esta forma, la empresa tendría la posibilidad de asegurar el suministro e instalación de mecheros encapsulados que cumplan las leyes ambientales con eficiencia técnica y económica. En primer lugar, se desarrolló el método matemático basado en principios físicos, químicos y matemáticos como: la combustión de gases hidrocarburos; la transferencia de calor a través de superficies; la asistencia de oxígeno para procesos de combustión; la incidencia de geometrías, caudales y composiciones en el dimensionamiento de estructuras. Asimismo, el método de dimensionamiento se rige por normas y estándares tanto nacionales como internacionales estipulados por: API 537 (2017), ASME STS-1 Steel Stacks (2017), EPA (1995), Código Orgánico del Ambiente (2018). Posteriormente, se realizó la validación del método con la comparación de las dimensiones obtenidas en esta investigación y proyectos anteriores desarrollados por compañías externas subcontratadas por SCMI dando resultados positivos con

desviaciones que no superan el 10% de error por lo que, al confirmar la interdependencia de resultados entre los dos métodos, se procedió a desarrollar el programa. El programa se realizó en la aplicación de Excel con la ayuda de macros por medio del software de programación VBA. La validación de funcionamiento del programa se realizó al obtener los mismos resultados, para 4 campos diferentes, que los obtenidos en la validación del método matemático. Finalmente, se consolidaron los pasos del programa de dimensionamiento, que se basa en su totalidad en el método matemático, en un manual de uso del programa siguiendo un diagrama de decisiones fundamentado.

5. Bibliografía

- API 537 : 2017, Pub. L. No. API STD 537 ADDENDUM 1 : 2020, FLARE DETAILS FOR PETROLEUM, PETROCHEMICAL, AND NATURAL GAS INDUSTRIES (2020).
- Asadi, J., Yazdani, E., Dehaghani, Y. H., & Kazempoor, P. (2021). Technical evaluation and optimization of a flare gas recovery system for improving energy efficiency and reducing emissions. *Energy Conversion and Management*, 236.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114076>
- ASME STS-1, Pub. L. No. STS-1–2016, Steel Stacks (2016).
- Ayuso, M. E. (2017). Análisis de las prácticas de quema y venteo de gas natural asociado: Obstáculos y avances en Latinoamérica. *ENERLAC. Revista de Energía de Latinoamérica y El Caribe*, 1(1), 66–105.
<https://enerlac.olade.org/index.php/ENERLAC/article/view/15>
- Bishnoi, D., & Chaturvedi, H. (2022). Optimal Design of a Hybrid Energy System for Economic and Environmental Sustainability of Onshore Oil and Gas Fields. *Energies*, 15(6). <https://doi.org/10.3390/en15062063>
- Burrows, L. C., Haeri, F., Cvetic, P., Sanguinito, S., Shi, F., Tapriyal, D., Goodman, A., & Enick, R. M. (2020). A Literature Review of CO₂, Natural Gas, and Water-Based Fluids for Enhanced Oil Recovery in Unconventional Reservoirs. *Energy & Fuels*, 34(5), 5331–5380. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b03658>
- Cala, O. M., Meriño, L., Kafarov, V., & Saavedra, J. (2013). EFECTO DE LA COMPOSICIÓN DEL GAS DE REFINERÍA SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN. *Revista Ingenierías Universidad de*

Medellín, 12, 101–111.

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-33242013000200009&nrm=iso

Chen, C., McCabe, D. C., Fleischman, L. E., & Cohan, D. S. (2022). Black Carbon Emissions and Associated Health Impacts of Gas Flaring in the United States. *Atmosphere*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/atmos13030385>

Clemente, M., Fonseca, R., & López, O. (2023). *Diseño de una batería de separación de hidrocarburos en baja presión a partir de la separación en presión intermedia* [Tesis de Grado]. Universidad de las Américas.

Clemente-Reyes, A., Martin-Del-Campo, C., Nelson, P. F., & Duran-Moreno, A. (2023a). A comparative assessment of open flame flares and enclosed ground flares for cleaner and safer hydrocarbon production in Mexico. *Cleaner Engineering and Technology*, 16, 100671. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100671>

Clemente-Reyes, A., Martin-Del-Campo, C., Nelson, P. F., & Duran-Moreno, A. (2023b). A comparative assessment of open flame flares and enclosed ground flares for cleaner and safer hydrocarbon production in Mexico. *Cleaner Engineering and Technology*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100671>

Cruz Maya, J. A., Sánchez Silva, F., Tolentino Eslava, G., Gómez Mercado, A., & Carvajal Mariscal, I. (2017). *ESTUDIO ANALÍTICO DEL COEFICIENTE DE DESCARGA EN TOBERAS SÓNICAS TOROIDALES ISO-9300*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/<https://www.cenam.mx/memorias/descarga/simposio%202002/doctos/te039.pdf>

- Cusanguá-Cisneros, Y. X., Sánchez-Moncayo, H. M., Calva-Sánchez, L. M., Salazar-Analuís, B. A., & Mantilla-Rivadeneira, A. V. (2021). Aprovechamiento del gas asociado en plataformas petroleras, caso de estudio campo Sacha. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 12(2), 26–36.
<https://doi.org/10.29166/revfig.v12i2.3090>
- Damodara, V. D., Alphones, A., Chen, D. H., Lou, H. H., Martin, C., & Li, X. (2020). Flare performance modeling and set point determination using artificial neural networks. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 11(1), 91–109. <https://doi.org/10.1007/s40095-019-00314-3>
- DIRECTIVA 2000/76/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 4 de Diciembre de 2000 Relativa a La Incineración de Residuos, Pub. L. No. L 332/91, Diario Oficial de las Comunidades Europeas (2000).
- Ebrahimi, M. (2023). 7 - Gas turbine power plant. In M. Ebrahimi (Ed.), *Power Generation Technologies* (pp. 263–318). Academic Press.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95370-2.00009-0>
- Gabay, A. (2023). En la Amazonía ecuatoriana, el petróleo amenaza décadas de esfuerzos de conservación liderados por indígenas. *Grist*.
- GGFR. (2024). *Global Gas Flaring Tracker Report*. www.worldbank.org
- Green, D. W., & Southard, M. Z. (2019). *Perry's chemical engineers' handbook* (9th ed.). McGraw-Hill Education.
- Hamidzadeh, Z., Sattari, S., Soltanieh, M., & Vatani, A. (2020). Development of a multi-objective decision-making model to recover flare gases in a multi flare gases zone. *Energy*, 203. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117815>

- Ibañez-Gómez, L. F., Albarracín-Quintero, S., Céspedes-Zuluaga, S., Montes-Páez, E., Junior, O. H. A., Carmo, J. P., Ribeiro, J. E., Moreira, M. M. A., Siqueira, A. A. G., & Guerrero-Martin, C. A. (2022). Process Optimization of the Flaring Gas for Field Applications. *Energies*, 15(20). <https://doi.org/10.3390/en15207655>
- Ismail, O. S., & Umukoro, G. E. (2016). Modelling combustion reactions for gas flaring and its resulting emissions. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 28(2), 130–140.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jksues.2014.02.003>
- Jeffry, L., Ong, M. Y., Nomanbhay, S., Mofijur, M., Mubashir, M., & Show, P. L. (2021). Greenhouse gases utilization: A review. *Fuel*, 301, 121017.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121017>
- Juicio No: 21201202000170, Pub. L. No. 21201202000170, Caso Mecheros (2021).
- Kambezidis, H. D. (2022). 3.02 - The Solar Resource☆. In T. M. Letcher (Ed.), *Comprehensive Renewable Energy (Second Edition)* (pp. 26–117). Elsevier.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819727-1.00002-9>
- Maarroof, A. A., 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). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18581>
- Mansoor, R., & Tahir, M. (2021). Recent Developments in Natural Gas Flaring Reduction and Reformation to Energy-Efficient Fuels: A Review. *Energy and Fuels*, 35(5), 3675–3714. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c04269>

- Marques-Riquelme, E. F., Vandu, C., Sluijterman, A., & Welch, C. (2024). Discharge Coefficients for Thin Restriction Orifices Based on the Homogeneous Direct Integration Method. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 63(3), 1578–1588. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c02720>
- McDonald-Buller, E., McGaughey, G., Grant, J., Shah, T., Kimura, Y., & Yarwood, G. (2021). Emissions and air quality implications of upstream and midstream oil and gas operations in Mexico. *Atmosphere*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/atmos12121696>
- Miller, B. G. (2011). 7 - Clean Coal Technologies for Advanced Power Generation. In B. G. Miller (Ed.), *Clean Coal Engineering Technology* (pp. 251–300). Butterworth-Heinemann. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-710-8.00007-8](https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-710-8.00007-8)
- MWM Int. (2025). *Gas asociado al petróleo (GAP)*. <https://www.mwm.net/es/excelencia-en-gas/soluciones-de-gas/gas-asociado-al-petroleo-gap/#:~:Text=El%20gas%20asociado%20al%20petr%C3%B3leo,Metano%20de%2025%20y%2095.>
- OAQPS. (2012). *Parameters for Properly Designed and Operated Flares*.
- Orisaremi, K. K., Chan, F. T. S., & Chung, N. S. H. (2021). Potential reductions in global gas flaring for determining the optimal sizing of gas-to-wire (GTW) process: An inverse DEA approach. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 93. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.103995>

- Repsol S.A. (2022). *Cómo se extrae el petróleo: todo el proceso*. Technology Lab: Petróleo y Gas.
- Saxena, M. R., Maurya, R. K., & Mishra, P. (2021). Assessment of performance, combustion and emissions characteristics of methanol-diesel dual-fuel compression ignition engine: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(5), 638–680.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.02.003>
- Shahab-Deljoo, M., Medi, B., Kazi, M.-K., & Jafari, M. (2023). A techno-economic review of gas flaring in Iran and its human and environmental impacts. *Process Safety and Environmental Protection*, 173, 642–665.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.03.051>
- Solsvik, J., Haug-Warberg, T., & Jakobsen, H. A. (2016). Implementation of chemical reaction equilibrium by Gibbs and Helmholtz energies in tubular reactor models: Application to the steam–methane reforming process. *Chemical Engineering Science*, 140, 261–278. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.10.011>
- Stewart, M. I. (2014). Chapter Eleven - Safety Systems. In M. I. Stewart (Ed.), *Surface Production Operations (Third Edition)* (Vol. 2, pp. 559–634). Gulf Professional Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382207-9.00011-1>
- Stone, D., Linch, S., & Pandullo, R. (1995). Flares. In *US Environmental Protection Agency*. Office of Air Quality Planning and Standards.
- Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2023). Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts. *Encyclopedia*, 3(1), 77–87.
<https://doi.org/10.3390/encyclopedia3010006>

Vallero, D. A. (2020). 27 - Energy and the Environment. In T. M. Letcher (Ed.), *Future Energy (Third Edition)* (pp. 583–609). Elsevier.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102886-5.00027-X>

Zardoya, A. R., Lucena, I. L., Bengoetxea, I. O., & Orosa, J. A. (2022). Research on an internal combustion engine with an injected pre-chamber to operate with low methane number fuels for future gas flaring reduction. *Energy*, 253.

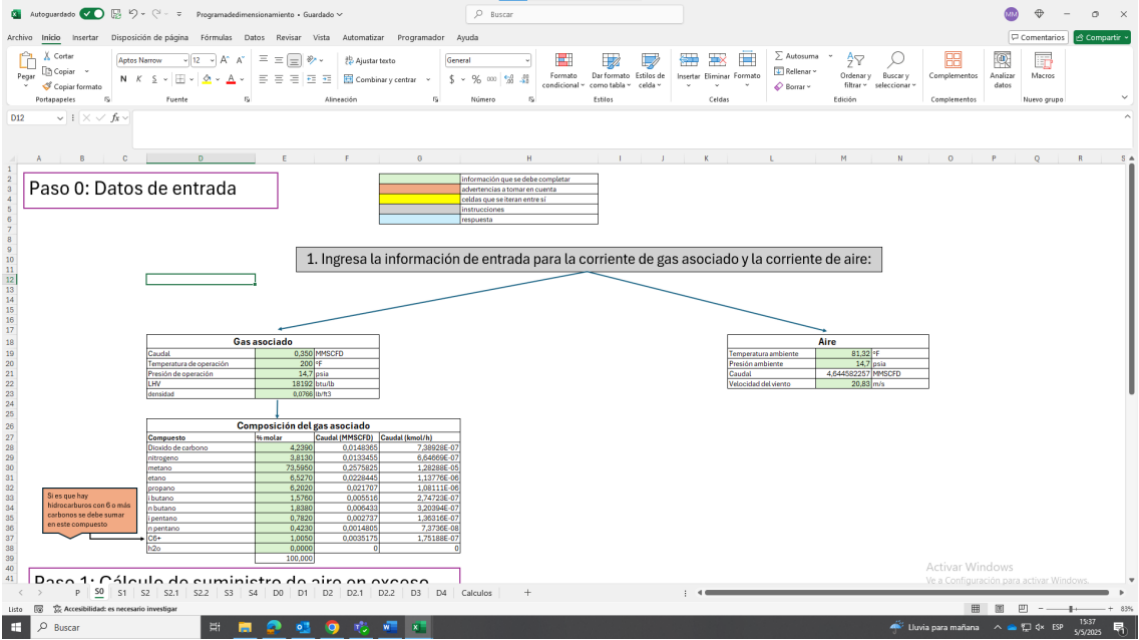
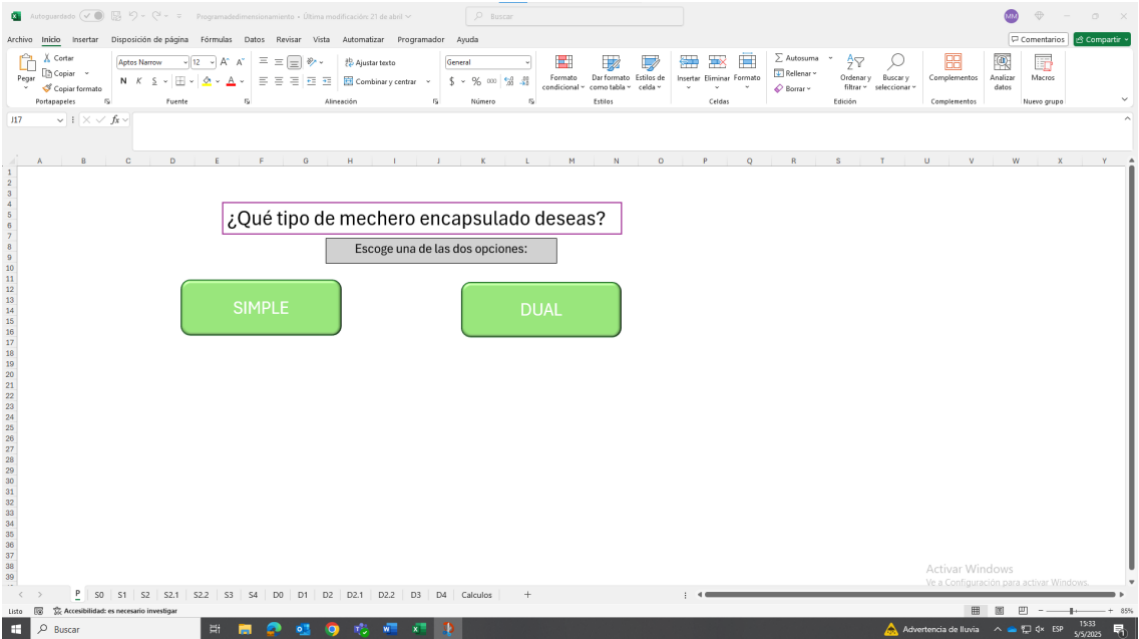
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124096>

Zhang, Y., & Luo, A. (2024). Applicability analysis of flame height estimation based on Byram's fireline intensity model under flat and windless conditions. *Scientific Reports*, 14(1), 4441. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55132-3>

Zhang, Z., Sherwin, E. D., & Brandt, A. R. (2021). Estimating global oilfield-specific flaring with uncertainty using a detailed geographic database of oil and gas fields. *Environmental Research Letters*, 16(12). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac3956>

6. Anexos

ANEXO A: Cálculo mechero encapsulado simple automático usando el programa



Paso 1: Cálculo de suministro de aire en exceso

1. Ingrese el porcentaje de aire en exceso que se suministrará:

Se recomienda colocar 15% de aire, valor que comúnmente

Aire en exceso		
% aire en exceso		
15		0.15

Cálculo suministro de aire

	Aire necesario (kmol/h)	Aire en exceso (kmol/h)
Hidrocarburos	0.000122131	0.000140451
metano	1.869558E-05	2.17984E-05
etano	2.57505E-05	2.8696E-05
propano	1.84126E-05	2.11749E-05
butano	7.86876E-06	9.19858E-06
pentano	7.82201E-06	9.11032E-06
Total (kmol/h)	0.00020115	0.000231322
Total (MKGCT/h)	4.0367973	4.64456237

← PÁGINA ANTERIOR PÁGINA SIGUIENTE →

Paso 2: Simulación en Hysys

1. Ingrese los siguientes datos obtenidos de Hysys:

Información que se debe completar:
 - Propiedades: Añada en counts
 - Cálculos que se hacen arriba y/o
 - Referencias
 - Requisitos

Condiciones gas asociado

Composición	Reacción molar
Dióxido de carbono	0.04
metano	0.54
etano	0.19
propano	0.07
butano	0.04
pentano	0.02
gasoleno	0.01
gasolina	0.01
gas	0.01
gas	0.01

Condiciones Aire

Temperatura ambiente	31.19
Presión ambiente	14.7 psia
Caída	4.844 MKGCT/h

Composición aire

Composición	Reacción molar
oxígeno	0.21
nitrogeno	0.79
gas	0.01

Condiciones gas de escape

Temperatura	348.99
Presión	14.7 psia
Caída	4.844 MKGCT/h

Composición gas de escape

Composición	Facción molar	Concentración (ppm)
Dióxido de carbono	0.04	0.07643796
metano	0.54	0.9783796
etano	0.19	0.35377814
propano	0.07	0.127
butano	0.04	0.069334
pentano	0.02	0.034666
gas	0.01	0.002081117
Total		

← PÁGINA ANTERIOR PÁGINA SIGUIENTE →

Paso 3: Dimensionamiento cámara de combustión

1. Ingrese el valor de altura de la cámara:
2. Itera el diametro "d" (modificar solo la celda verde)

Datos de entrada	
Flujo de gases de escape	4.805 m³/s
Volumen Reactivos en volumen de escape	5651.1925 m³/s
Temperatura de escape (T)	286553.1 K
Altura de la cámara (h)	5.70 m
Velocidad	1.00025794 m/s
Q (cantidad de calor que sale de la cámara)	1661.00025794 m³/s
Temperatura de escape (T)	500.15 K
Q (cantidad de calor que sale de la cámara)	1.00025794 m³/s
Temperatura de escape (T)	5248.15 K
C (coeficiente de descarga)	0.62
Temperatura de escape (T)	500.15 K
Temperatura ambiente	293.15 K
Cantidad de calor que se va a quemar	0.355 m³/s
Peso de calor en el proceso de combustión	117.00 kJ/s
Peso de calor en el proceso de combustión	0.80

Paso 3.1: diámetro

Cálculo Q2	
Q2	2026.3310 m³/s

Cálculo diámetro	
Q2	2026.3310 m³/s
Q2	13.50580214 m/s
Q2	48620.49171 m/s
Q2	0.47020288 m/s
Q2	1.00025794 m/s
Q2	1.004821514 m/s
Q2	1.43 m

Dimensiones finales cámara de combustión

Dimensiones finales cámara de combustión	
Altura	5.70 m
Diámetro	1.43 m
Área transversal	1.618458002 m²

Paso 3.2: Volumen

Cálculo de volumen	
Volumen 1	13.5704422 m³/s
Volumen 2	15.7604704 m³/s

Paso 4: Dimensionamiento refractario

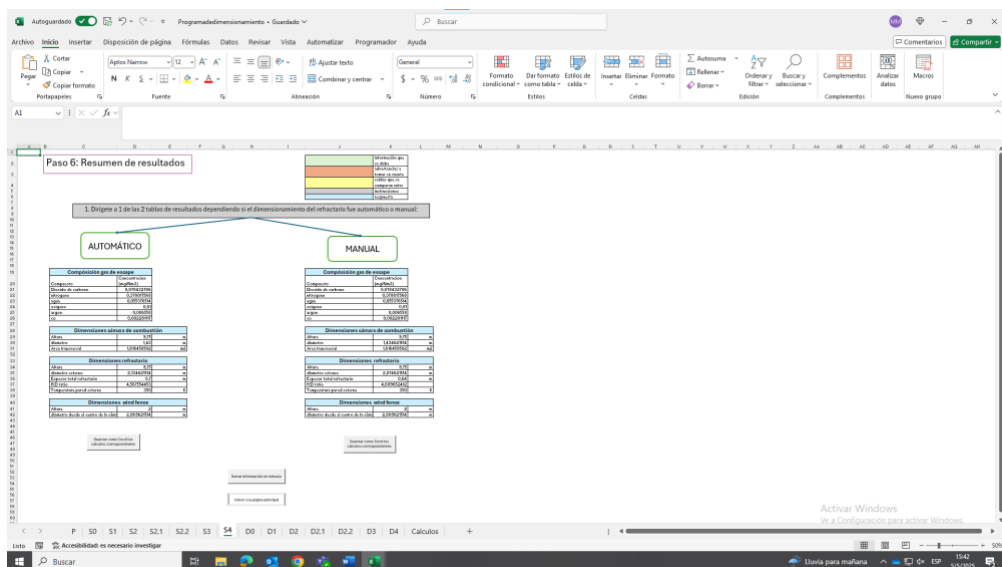
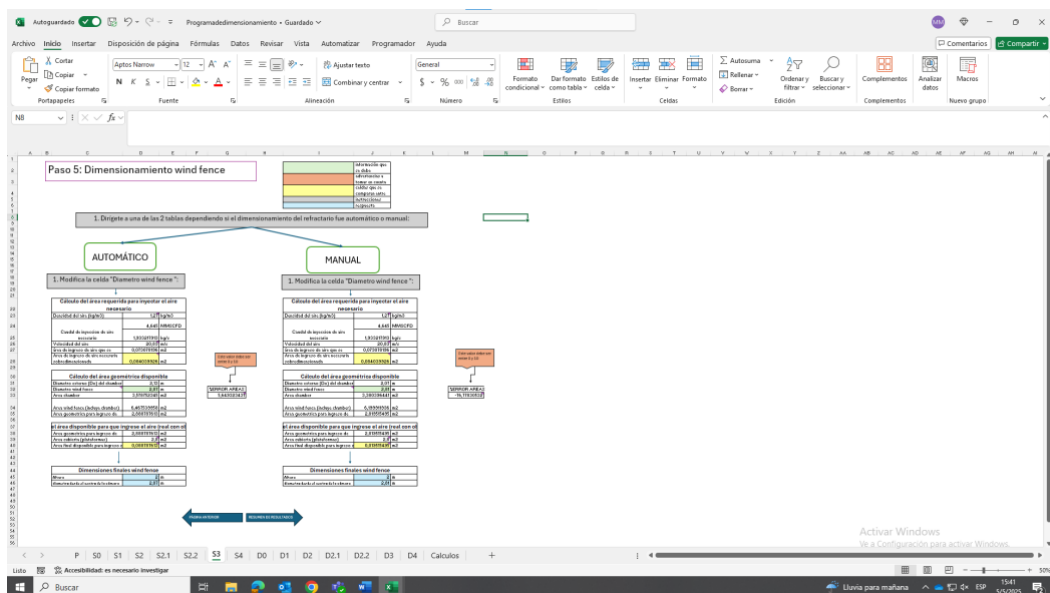
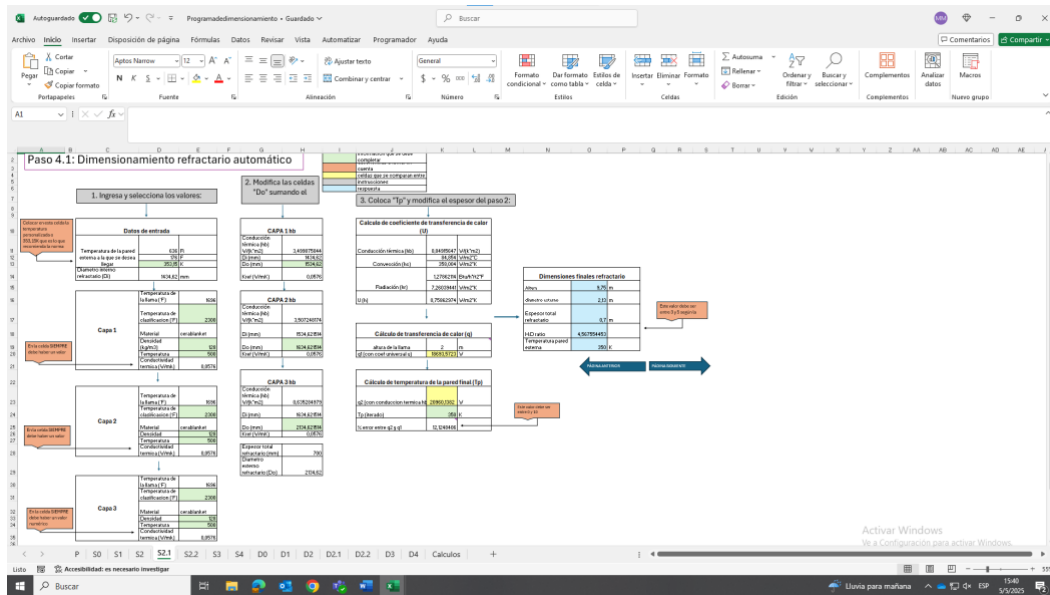
1. Escoge una de las dos opciones

AUTOMÁTICO **MANUAL**

Paso 4: Dimensionamiento refractario

1. Escoge una de las dos opciones




AUTOMÁTICO **MANUAL**



ANEXO B: Manual de uso mechero encapsulado simple

0. Introducción

Antes de empezar a utilizar el programa es importante tomar en cuenta la siguiente información general:

- I. Dentro de una misma hoja: El flujo del programa está dirigido por flechas delgadas azules “  ”. Son unidireccionales para evitar confusiones.
- II. En distintas hojas: El flujo del programa está dirigido por flechas gruesas azules “  ” “  ”. Apuntan a la izquierda para retroceder una página anterior o a la derecha si se desea dirigir a la siguiente página. Esto indica que no se acaban los “pasos” en esa hoja hasta encontrar estas dos flechas.
- III. Todos los ambientes del programa manejan el mismo código de colores que se detalla a continuación:

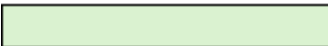


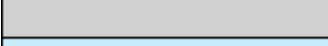

	información que se debe completar
	advertencias a tomar en cuenta
	celdas que se iteran entre sí
	instrucciones
	respuesta

Figura 2. Código de colores para las celdas del Excel.

1. Paso 0: datos de entrada

0. Al ingresar al Excel “Programadimensionamiento” dirigirse a la hoja “P”.
1. Una vez ubicados en la hoja “P” se debe seleccionar si el programa va a ser para:
 - a. Una corriente de gas asociado¹²: simple
 - b. Dos corrientes de gas asociado: dual
2. El programa le dirigirá a la hoja “0” ya sea para una cámara de combustión simple (S0) o dual (D0)

¹² Gas asociado al petróleo que será combustionado en el mechero encapsulado.

- Una vez en la hoja “S0” se deben ingresar los datos de entrada tanto para la corriente del gas asociado como para el aire (cuyas condiciones son las ambientales). Las condiciones de operación y ambientales corresponden a cada pozo. La composición, la densidad y el LHV del gas asociado se encuentran en su respectiva cromatografía.

***Nota 1: en el caso de que en la cromatografía del gas asociado haya hidrocarburos con más de seis carbonos (por ejemplo: heptanos u octanos) se debe sumar el porcentaje molar de esos hidrocarburos al porcentaje molar del hexano y colocar en la celda que se encuentra encerrada en color rojo en la figura 1.

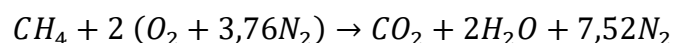
Compósición del gas asociado			
Compuesto	% molar	Caudal (MMSCFD)	Caudal (kmol/h)
Dioxido de carbono	4,2390	0,0148365	7,38928E-07
nitrogeno	3,8130	0,0133455	6,64669E-07
metano	73,5950	0,2575825	1,28288E-05
etano	6,5270	0,0228445	1,13776E-06
propano	6,2020	0,021707	1,08111E-06
i butano	1,5760	0,005516	2,74723E-07
n butano	1,8380	0,006433	3,20394E-07
i pentano	0,7820	0,002737	1,36316E-07
n pentano	0,4230	0,0014805	7,3736E-08
C6+	1,0050	0,0035175	1,75188E-07
h2o	0,0000	0	0

Figura 3. Muestra la celda de la que se habla en la "Nota 1"

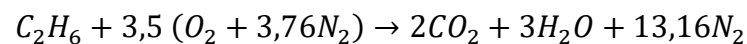
2. Paso 1: Cálculo de suministro de aire en exceso

- Al deslizar hacia abajo la hoja “S0” se encontrará el “paso 1” en el que únicamente se debe ingresar el valor de aire en exceso que se va a suministrar como porcentaje. Se recomienda que al menos se ponga 15% de exceso, este es el valor común en el que se logra la combustión casi completa. El programa realizará el cálculo estequiométrico para obtener el caudal de aire necesario y en exceso para combustionar el gas con las condiciones y composiciones que anteriormente se ingresaron a través de las siguientes ecuaciones químicas:

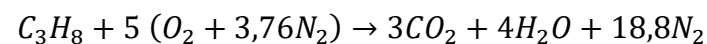
Ecuación 19. Ecuación de combustión de metano balanceada



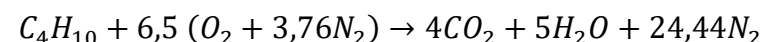
Ecuación 20. Ecuación de combustión de etano balanceada



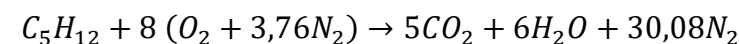
Ecuación 21. Ecuación de combustión de propano balanceada



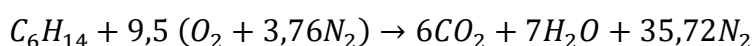
Ecuación 22. Ecuación de combustión de butano balanceada



Ecuación 23. Ecuación de combustión de pentano balanceada



Ecuación 24. Ecuación de combustión de hexano balanceada



2. El caudal del aire en exceso en [MMSCFD] que se debe suministrar se muestra al final de la tabla “Cálculo suministro de aire” en una celda celeste.
3. Una vez llegada a esta parte se encuentran dos flechas azules gruesas para avanzar y retroceder. Aplastar en “página siguiente” para continuar con el cálculo.

3. Paso 2: Simulación en Hysys

1. Una vez ubicados en la hoja “S1”, se debe ingresar al software de simulación y abrir el archivo “Simple” según corresponda.
2. Dirigirse a la parte de “simulación” pues la configuración en “propiedades” ya está establecida.
3. En el ambiente de “simulación” hacer click en la corriente “GAP” y colocar los datos de las tablas: “Condiciones gas asociado” y “Composición gas asociado”.

4. En el ambiente de “simulación” hacer click en la corriente “Aire” y colocar los datos de la tabla: “Condiciones aire”. No se debe ingresar los datos de la tabla “Composición de aire” pues ya están ingresados en el archivo al ser constantes.

***Nota 2: Tomar en cuenta las unidades del software y las unidades de las tablas.

5. Una vez corrida la simulación, entrar a la corriente “Gas de escape” y anotar los valores arrojados para llenar la tabla “Condiciones gas de escape” y “Composición gas de escape”
6. El Excel no le permitirá avanzar en el caso de que el valor en la composición de oxígeno ingresado sea menor o igual a 0,0000. Debe ser mayor pues es la única forma de asegurar que se está suministrando aire en exceso, en este caso debe regresar a la página “S0” y aumentar el % de aire en exceso en la tabla “Aire en exceso” hasta que la fracción molar de oxígeno a la salida en la simulación sea mayor a 0,0000.
7. Finalmente, en esta hoja “S1”, el Excel hace el cálculo de concentración de cada componente en $[\text{mg}/\text{Nm}^3]$ que se muestra en la tabla “Composición gas de escape” en celdas celestes. El Excel está configurado para mostrar una advertencia en el caso de que la concentración de monóxido de carbono exceda el valor de 196 $[\text{mg}/\text{Nm}^3]$, valor establecido por el Código Orgánico del Ambiente (2018) que corrige las concentraciones al 7% de oxígeno en exceso¹³.
8. Una vez llegada a esta parte se encuentran dos flechas azules gruesas para avanzar y retroceder. Aplastar en “página siguiente” para continuar con el cálculo.

¹³ Para mayor detalle de cálculos y fundamentos teóricos ver el documento “Trabajo de titulacion” en la sección metodología

4. Paso 3: Dimensionamiento cámara de combustión

1. En la hoja “S2” se debe empezar por ingresar el valor de la altura de la cámara de combustión siguiendo el criterio que relaciona el caudal de GAP y la altura de la cámara de combustión:

Tabla 7. Criterio de relación para el caudal de GAP y la altura de la cámara de combustión

Caudal de GAP a combustionar [MMSCFD]	Altura cámara de combustión [m]
0 a 0,5	9,75
0,6 a 1	11
1,1 a 2	12,25
2,1 a 5	14,5
5,1 a 9	17

***Nota verificar que una vez colocado el valor de la altura se cumpla con la primera advertencia tome que menciona “Máxima velocidad permitida por la ASME es 18,3 m/s”. En el caso de no cumplir se varía la altura unos decimales hasta alcanzar el objetivo.

2. Posteriormente, se procede a modificar la celda verde “d” para sumar equis valor a la celda blanca “d”. El objetivo es iterar el diámetro hasta cumplir con la segunda advertencia tome que menciona “Este valor debe ser entre 0 y 10”, esta advertencia esta relacionada con los volúmenes 1 y 2, en el que el volumen 2 que representa a la geometría de la cámara debe ser mayor al volumen 1 que es el necesario para la combustión. Al aumentar cierta cantidad al diámetro calculado para colocar el valor en la celda verde “d” únicamente se debe cumplir la segunda advertencia de la tabla “%error volúmenes”.
3. Visualizar las dimensiones finales que se muestran en la tabla de la derecha con celdas celestes

5. Paso 4: Dimensionamiento refractario

1. En esta sección, en la hoja “S2”, se debe escoger entre las dos opciones de cálculo de refractario:
 - a. Automático: esta opción de dimensionamiento ofrece al usuario escoger el tipo de material del que estaría hecho el refractario, la densidad que tendría y con eso asigna un valor de conductividad térmica. Tiene una red amplia de opciones y a partir de ese valor se haría el dimensionamiento
 - b. Manual: en esta opción el usuario debe colocar manualmente el valor de conductividad térmica. Se utiliza esta opción en caso de no haber encontrado el material o la densidad deseada en la opción “automática de dimensionamiento”
2. Una vez seleccionado el botón “automático” te dirigirá a la hoja “S2.1”.
 - i. En la tabla “datos de entrada” colocar la temperatura en [K] a la que se quiere llegar en la pared externa del refractario. Si no hay un valor en específico se recomienda colocar 353.15[K] que es lo que dicta la norma como “valor común”.
 - ii. En las tablas “capa 1”, “capa 2”, “capa 3” se debe seleccionar la “temperatura de clasificación¹⁴”, “densidad” y “temperatura¹⁵” en ese orden.

****Nota: si en la celda de conductividad térmica sale “#N/D” es porque la “densidad” o “temperatura⁴” no están bien seleccionadas en las opciones existentes. Si en la celda de conductividad térmica

¹⁴ Temperatura más alta en el que la contracción del material no supera el límite especificado

¹⁵ Temperatura de operación, seleccionar la temperatura igual o mayor a la temperatura indicada en la celda “Temperatura de la llama (°F)”

sale “no” es porque el catálogo no ofrece un valor para esas condiciones. En los dos casos se debe escoger otra “temperatura de clasificación³”, “densidad” o “temperatura⁴” pues siempre debe haber un valor de conductividad para hacer el dimensionamiento.

- iii. En las tablas “capa 1 hb”, “capa 2 hb”, “capa 3 hb” se debe modificar la celda verde “Do” y sumar el espesor deseado en [mm] para cada capa.

****Nota: es importante mantener en todo momento las 3 capas. Por ejemplo, si se desea un solo material de 900mm de espesor se deberá colocar de igual forma el mismo material en las tres tablas y en cada capa sumar 300mm para poder llegar al espesor deseado. De igual forma proceder si solo se desean dos materiales, se debe repartir el espesor en las 3 capas y que dos de ellas sean del material A y la otra capa del material B.

- iv. Finalmente, en la tercera sección se debe llenar la celda verde “Tp iterado” con el mismo valor o menor que el declarado en la celda “Temperatura de la pared externa a la que se desea llegar” no puede ser mayor pues es el que se definió para todo el cálculo y puede ser el deseado por el cliente o por norma.
- v. Una vez con la celda “Tp iterado” llena, el objetivo es cumplir con la advertencia “Este valor debe ser entre 0 y 10” y para eso se deberá aumentar o disminuir el espesor en las capas (ya sea en solo 1, 2 o las 3) dependiendo de la decisión del usuario.
- vi. Visualizar las dimensiones finales que se muestran en la tabla de la derecha con celdas celestes.

- vii. Una vez llegada a esta parte se encuentran dos flechas azules gruesas para avanzar y retroceder. Aplastar en “página siguiente” para continuar con el cálculo.
3. Una vez seleccionado el botón “manual” te dirigirá a la hoja “S2.2”.
- i. En la tabla “datos de entrada” colocar la temperatura en [K] a la que se quiere llegar en la pared externa del refractario. Si no hay un valor en específico se recomienda colocar 353.15[K] que es lo que dicta la norma como “valor común”.
 - ii. En las tablas “capa 1 hb”, “capa 2 hb”, “capa 3 hb” se debe llenar la celda “Kref (W/mK)” con el coeficiente de conductividad térmica que desee el usuario. Además, se debe modificar la celda verde “Do” y sumar el espesor deseado en [mm] para cada capa.
- ****Nota: es importante mantener en todo momento las 3 capas. Por ejemplo, si se desea un solo material de 900mm de espesor se deberá colocar de igual forma el mismo material en las tres tablas y en cada capa sumar 300mm para poder llegar al espesor deseado. De igual forma proceder si solo se desean dos materiales, se debe repartir el espesor en las 3 capas y que dos de ellas sean del material A y la otra capa del material B.
- iii. Finalmente, en la tercera sección se debe llenar la celda verde “Tp iterado” con el mismo valor o menor que el declarado en la celda “Temperatura de la pared externa a la que se desea llegar” no puede ser mayor pues es el que se definió para todo el cálculo y puede ser el deseado por el cliente o por norma.

- iv. Una vez con la celda “Tp iterado” llena, el objetivo es cumplir con la advertencia “Este valor debe ser entre 0 y 10” y para eso se deberá aumentar o disminuir el espesor en las capas (ya sea en solo 1, 2 o las 3) dependiendo de la decisión del usuario.
- v. Visualizar las dimensiones finales que se muestran en la tabla de la derecha con celdas celestes.
- vi. Una vez llegada a esta parte se encuentran dos flechas azules gruesas para avanzar y retroceder. Aplastar en “página siguiente” para continuar con el cálculo.

6. Paso 5: Dimensionamiento wind fence

1. Una vez en la hoja “S3” dirigirse a la sección de la izquierda si el dimensionamiento del refractario fue por la vía “automática” y dirigirse a la sección de la derecha si el dimensionamiento del refractario fue por la vía “manual”.
2. Ya sea en la tabla de la izquierda o derecha modificar la celda verde “Diametro wind fence” e ir sumando poco a poco hasta cumplir con la advertencia “Este valor debe ser entre 0 y 10” pues de esa forma aseguramos que el área del wind fence disponible es mayor al área necesaria para suministrar el aire durante la combustión.

****Nota: se ha definido un valor de $2,8[m^2]$ para “Area cubierta (plataformas)” que es un valor antes utilizado para representar el área cubierta por plataformas o dampers pero puede ser modificado según necesidad del usuario.

3. Visualizar las dimensiones finales que se muestran en la tabla de abajo con celdas celestes.
4. Una vez llegada a esta parte se encuentran dos flechas azules gruesas para avanzar y retroceder. Aplastar en “página siguiente” para observar el resumen de los resultados obtenidos

7. Paso 6: Resumen de resultados

2. Una vez en la hoja “S4” dirigirse a la sección de la izquierda si el dimensionamiento del refractario fue por la vía “automática” y dirigirse a la sección de la derecha si el dimensionamiento del refractario fue por la vía “manual”.
3. Visualizar las dimensiones finales que se muestran en las tablas con encabezados celestes, una vez acabado el cálculo puede:
 - a. Guardar el Excel con los resultados obtenidos: (aplastar el botón de la izquierda si el dimensionamiento del refractario fue por la vía “automática” y aplastar el de la derecha si el dimensionamiento del refractario fue por la vía “manual”). Esta opción guardará únicamente las hojas correspondientes en formato xls.
 - b. Borrar información de entrada: lo que eliminará los cálculos de forma permanente desde la hoja “S0”
 - c. Volver a la página principal: pero de todas formas los cálculos quedarán guardados y registrados y se podrá empezar de nuevo desde el inicio, pero las celdas estarán llenas.
4. Cerrar el programa (se guardará lo que se realizó al final)