

Estudio conceptual de los sistemas de separación por coalescencia para corrientes de gas  
natural: caso de estudio

Angie Lizeth Monsalve García y Neil Armstrong Ramírez Argumedo

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Químico

Director

Carlos Augusto Godoy Ruiz  
Especialista en Ingeniería del Gas

Codirector

Hernando Guerrero Amaya  
PhD. Electroquímica, Ciencia y Tecnología

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas  
Escuela de Ingeniería Química  
Bucaramanga

2021

## **Dedicatoria**

*A Dios por darme salud, sabiduría y llenarme de fortaleza para lograr culminar esta etapa a pesar de las adversidades; y además por cruzar en mi camino y permitirme conocer a las personas maravillosas que hoy forman parte importante de mi vida.*

*A mis padres Rafael y Rudy por su apoyo incondicional, sus consejos y enseñanzas, por guiarme y desde muy pequeña permitirme tomar mis propias decisiones, por motivarme a seguir adelante a pesar de los momentos difíciles, por ayudarme a crecer tanto personal como profesionalmente para llegar a convertirme en la persona que actualmente soy.*

*A mi hermano Sergio por confiar en mí y porque sin importar qué, siempre está ahí para acompañarme cuando más lo necesito.*

*A mi hermana Karen por siempre creer en mí, por haberme impulsado a seguir adelante, por apoyarme, motivarme e inspirarme a seguir creciendo y por todo el amor.*

*A mis amigos por haber hecho de mi etapa universitaria una de las mejores que he vivido, muchas gracias por todos los momentos, por las risas y por siempre impulsarnos mutuamente a dar lo mejor de nosotros.*

*A mi compañero de trabajo de grado, Neil Ramírez por su amistad durante todos estos años, por su paciencia y por verle siempre el lado positivo a todo. Espero que sigamos compartiendo éxitos a lo largo de nuestra vida.*

***Angie Lizeth Monsalve García***

*A Dios en primer lugar, por ser mi guía en este largo proceso y permitirme vivir un día más para cumplir mis metas, a él doy gracias por mi familia y por la segunda oportunidad que nos ha brindado luego de un año tan difícil para muchas personas.*

*A mi madre Silvia, que a partir de ahora observará mis logros desde el cielo, la amaré por siempre e intentaré seguir siendo el ser humano que con tanto esfuerzo y amor educó, no me duele que ella no esté presente en este logro porque estoy seguro de que siempre estará conmigo y de que su más grande deseo es que su familia sea feliz.*

*A mi padre Neil, al cual Dios le dio una segunda oportunidad, por su constante compromiso con nuestro hogar y su duro trabajo para que pudiéramos tener la oportunidad de una buena educación y un buen futuro, siempre desearemos su bienestar y su felicidad, espero que este logro sea parte de ella.*

*A mis hermanos Jesús David y Jeisson, por ser siempre mi compañía y sobre todo un gran apoyo para juntos salir adelante ante tan difícil situación que Dios nos puso en el camino. Les deseo lo mejor a ambos en sus vidas personales y profesionales, pero principalmente que continúen siendo los grandes seres humanos que son hoy en día.*

*A mi pareja Daniela, quien ha sido confidente de mis mayores problemas, por brindarme su lealtad e incondicionalidad, sé que siempre puedo contar con ella y cada día me impulsa a lograr nuevos objetivos.*

*Finalmente, a mi compañera de trabajo Angie con quién hemos compartido muchos años de amistad y trabajo, agradezco por las risas y los buenos momentos vividos, siempre le desearé lo mejor en su vida profesional.*

**Neil Arnstrong Ramírez Argumedo**

### **Agradecimientos**

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander, nuestra Alma Máter, por acogernos y darnos la oportunidad de ser parte de su comunidad universitaria.

A la Escuela de Ingeniería Química por ser parte importante en nuestro desarrollo como profesionales y como personas.

Al profesor Carlos Godoy, nuestro director y a nuestro codirector Hernando Guerrero, por la colaboración y el apoyo que nos brindaron para sacar el proyecto adelante en medio de un año de dificultades, a los dos les deseamos mucha salud y prosperidad.

Finalmente, a todas esas personas que estuvieron asociadas de cierto modo en nuestra vida universitaria, los cuales ayudaron a que esto fuera posible.

**Tabla de contenido**

Introducción .....	12
1. Marco teórico .....	15
2. Estado del arte.....	19
2.1. Eliminadores de neblina tipo malla.....	20
2.2. Eliminadores de neblina tipo vanes o paletas .....	22
2.3. Eliminadores de neblina ciclónicos .....	24
2.4. Eliminadores de neblina combinados .....	26
3. Objetivos.....	28
3.1. Objetivo general.....	28
3.2. Objetivos específicos .....	28
4. Descripción metodológica .....	29
5. Resultados .....	31
5.1. Etapa II.....	31
5.1.1. Análisis de arreglos mecánicos .....	31
5.1.2. Caracterización del actual sistema de separación caso de estudio.....	36
5.1.2.1. Análisis del comportamiento de fases.....	38
5.1.2.2. Eficiencia actual del sistema de separación. ....	39
5.2. Etapa III.....	40
5.2.1. Selección del arreglo mecánico .....	40
6. Conclusiones .....	44

7.Recomendaciones .....	45
Referencias bibliográficas.....	46
Apéndices.....	50

**Lista de Tablas**

Tabla 1. Composición de la corriente "GAS COMBUSTIBLE PY" .....	37
Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas de la corriente "GAS COMBUSTIBLE PY". .....	37
Tabla 3. GPM Condensables.....	39
Tabla 4. Cuadro comparativo de separadores verticales de gas y líquido. ....	40

**Lista de Figuras**

Figura 1. Secciones de un separador gas-líquido.....	18
Figura 2. Eliminadores de niebla actuales de tipo malla. ....	21
Figura 3. Eliminadores de niebla actuales de tipo paletas. ....	23
Figura 4. Eliminadores de niebla actuales de tipo ciclón.....	25
Figura 5. Eliminadores de niebla actuales de tipo combinados. ....	27
Figura 6. Diagrama de flujo del proyecto. ....	30
Figura 7. Envolvente del gas de entrada “GAS COMBUSTIBLE PY”. ....	38
Figura 8. Alternativas de diseño .....	42

## Apéndices

Apéndice A. Torre de separación vista desde el este.....	50
Apéndice B. Torre de separación vista desde el norte.....	50
Apéndice C. Torre de separación vista desde el sur. ....	51

## Resumen

**Título:** Estudio conceptual de los sistemas de separación por coalescencia para corrientes de gas natural: caso de estudio\*

**Autor:** Angie Lizeth Monsalve García, Neil Armstrong Ramírez Argumedo\*\*

**Palabras Clave:** Gas natural, sistemas de separación, eliminador de niebla.

### Descripción:

La presente investigación tiene como objetivo realizar una conceptualización sobre los diferentes sistemas de separación por coalescencia para la remoción de hidrocarburos pesados del gas natural, a fin de evidenciar los nuevos desarrollos tecnológicos que se han implementado. Para realizar la búsqueda se utilizaron las bases de datos proporcionadas por la universidad y, a partir de la información recopilada, se analizaron los diferentes factores que se deben tener en cuenta al momento de seleccionar un arreglo mecánico, entre esos se encuentra la eficiencia de eliminación de gotas, la capacidad del gas, el manejo de líquidos, entre otros. Acto seguido, se llevó a cabo la caracterización del sistema actual de remoción de hidrocarburos licuables con la ayuda de la información proporcionada por la compañía del caso de estudio.

Teniendo en cuenta lo anterior, se escogió el dispositivo, es decir, el eliminador de niebla, con la configuración de un arreglo de paletas seguido de uno de malla, ya que a consideración es el más efectivo en la recuperación de los hidrocarburos pesados de la corriente de “GAS COMBUSTIBLE PY”. Finalmente, con base en la literatura asociada se plantearon 3 alternativas de diseños que podrían ser adaptados al sistema de separación del caso de estudio.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería química. Director: Carlos Augusto Godoy Ruiz. Especialista en Ingeniería del Gas. Codirector: Hernando Guerrero Amaya. PhD. Electroquímica, Ciencia y Tecnología.

### Abstract

**Title:** Conceptual study of coalescence separation systems for natural gas streams: case study\*

**Author:** Angie Lizeth Monsalve García, Neil Armstrong Ramírez Argumedo \*\*

**Key Words:** Natural gas, separation systems, mist eliminator.

#### Description:

The objective of this research is to conceptualize the different coalescence separation systems for the removal of heavy hydrocarbons from natural gas, in order to show the new technological developments that have been implemented. To carry out the search, the databases provided by the university were used and, based on the information gathered, the different factors that must be taken into account when selecting a mechanical arrangement were analyzed, including droplet removal efficiency, gas capacity, liquid handling, among others. Right after, a characterization of the current liquefiable hydrocarbon removal system was carried out with the help of the information provided by the case study company.

Considering the above, the device, i.e., the mist eliminator, with the configuration of a vane arrangement followed by a mesh one, was chosen, since it is considered the most effective in the recovery of heavy hydrocarbons from the “PY FUEL GAS” stream. Finally, based on the associated literature, three alternative designs were proposed that could be adapted to the separation system of the case study.

---

\* Bachelor's Thesis

\*\* Physical and Chemical Engineering's Faculty. School of Chemical Engineering. Director: Carlos Augusto Godoy Ruiz. Gas Engineering Specialist. Co-director: Hernando Guerrero Amaya. Ph.D. Electrochemistry, Science and Technology.

## Introducción

El proceso de separación del gas y petróleo, es uno de los primeros y más importantes procesos que se desarrollan en la industria petrolera, la eficiencia de éstos es de vital importancia, para la industria de los hidrocarburos (Morales). En los diversos procesos realizados en la producción, transporte, distribución y uso final del gas natural se debe tener en cuenta que mejorar la calidad de la composición química del gas no sólo está reglamentado, sino que se puede obtener un beneficio de ello. Uno de los principales procesos realizados es la separación de condensado para mejorar y optimizar su transporte y distribución. Si se estudia y se mejora este proceso, se puede realizar la separación de los componentes C<sub>3</sub>+ del Gas Natural mejorando la calidad y además permitiendo obtener otros beneficios de los componentes separados al comercializarlos de manera independiente (Jaimes & Herrera, 2012).

Debido a que cada vez es menos probable encontrar yacimientos con grandes reservas, se hace importante obtener reservas adicionales de los campos existentes. (Florez L., 2019) expone que los campos maduros se caracterizan porque llevan operando más de 20 años y como resultado de su bajo factor de recobro, muestran una declinación constante en la producción y una gran magnitud de reservas remanentes. Con las coyunturas actuales de un alto precio y una demanda creciente, se hace más viable económicamente invertir en estos campos con el objetivo básico de optimizar el proceso para lograr un aumento en el recobro de hidrocarburos, con lo cual se extiende la vida útil del campo y se mejora la rentabilidad del mismo ya que al existir una infraestructura previa, no es necesario realizar grandes inversiones en sistemas de tratamiento y transporte que se necesitarían en nuevos desarrollos (Gil & Chamorro, 2009).

La empresa PSC opera un campo maduro que se encuentra ubicado en la cuenca del Magdalena Medio, en el área del municipio de Sabana de Torres perteneciente al departamento de

Santander. Este campo denominado “CAMPO PY” posee una planta de tratamiento de gas cuyo objetivo es recuperar principalmente líquidos de gas natural (LGN). La corriente de gas en estudio “GAS COMBUSTIBLE PY”, es la actualmente usada como combustible para todos los equipos que consumen gas natural. El flujo usado como combustible es de aproximadamente 1 MMSCFD (Millones de Pies Cúbicos por Día) y actualmente se recuperan cerca de 1000 gal/d de condensados. Para la recuperación de condensados, la corriente de gas pasa por un separador bifásico vertical en donde se retira vapor de agua libre y los hidrocarburos de cadena larga para evitar futuros problemas en el sistema de transporte y distribución de gas natural. Sin embargo, el sistema de separación utilizado es muy antiguo por lo que su eficiencia es inferior a comparación de otros equipos actuales diseñados para el mismo propósito y en consecuencia limita la recuperación de estos hidrocarburos condensables (Kidnay & Parrish, 2006).

Debido a esta limitación se requiere encontrar una solución para aumentar la eficiencia de este sistema de separación, logrando como resultado un incremento en la producción de LGN, los cuales tienen un valor agregado en el mercado de hidrocarburos (para el caso de estudio, el condensado tratado tiene precio de crudo, ya que es utilizado como diluyente). Por esto surge la pregunta ¿qué arreglo mecánico se le puede adaptar al sistema de separación para mejorar la tasa de remoción de los hidrocarburos de cadena larga de la corriente de gas natural del caso de estudio?

En este estudio se observará a través de la literatura, cómo ha avanzado la ingeniería en el desarrollo de nuevos mecanismos y soluciones para mejorar la separación por coalescencia para corrientes de gas. Además, se realizará un análisis a partir de la información recopilada, sobre las cualidades de los diferentes arreglos mecánicos existentes para la conveniencia en la instalación al sistema de separación. Finalmente, se estudiarán tres posibles diseños para ser adaptados. En

cada uno de ellos se analizarán las ventajas y desventajas para su implementación al sistema ya existente del caso de estudio, para mejorar su eficiencia.

## 1. Marco teórico

El gas natural es un combustible fósil que se encuentra en formaciones presentes en el subsuelo marino y continental. Está conformado por una mezcla compleja de hidrocarburos livianos, en donde el metano se encuentra en mayor proporción, seguido de etano, propano, butano, pentano, hexano y algunas trazas de hidrocarburos pesados. También puede contener compuestos de naturaleza inorgánica como agua, nitrógeno, dióxido de carbono, sulfuro de hidrogeno, disulfuro de carbono, hidrogeno, helio y argón (Prieto Jiménez, González Silva, & Chaves Guerrero, 2019).

El gas natural es almacenado en yacimientos subterráneos y puede encontrarse en depósitos de roca en la corteza terrestre. Dependiendo de los fluidos que se encuentren en el yacimiento del gas, es posible clasificarlo como gas no asociado (contiene trazas no significativas de hidrocarburos pesados mayores) o asociado (puede contener gases no hidrocarbonados y cantidades considerables de hidrocarburos pesados). Dependiendo de su contenido de componentes pesados, el gas natural puede considerarse rico (5-6 GPM o más de hidrocarburos) o pobre (menos de un GPM) (Mokhatab, Poe, & Speight, 2006). El gas se clasifica también como dulce o amargo según el contenido de H<sub>2</sub>S y CO<sub>2</sub> (Mokhatab, Poe, & Speight, 2006).

La Comisión Reguladora de Energía y Gas (CREG) ha establecido las especificaciones para poder distribuir, transportar o vender gas natural en Colombia. Con el fin de cumplir con las condiciones establecidas y evitar problemas en el sistema, es necesario separar la fase líquida y los hidrocarburos pesados del gas natural.

Durante años se ha utilizado un proceso basado en operaciones convencionales de separación, en el cual se emplean tres etapas: endulzamiento, deshidratación y control de punto de rocío. Como primera instancia, es necesario realizar un pretratamiento para retirar del gas crudo,

los sólidos que pudieron haberse formado durante el transporte desde el pozo y las arenas arrastradas, así como parte de los hidrocarburos pesados y el agua libre. Posteriormente, inicia la fase de endulzamiento en la que se retiraran los compuestos tóxicos y corrosivos como el dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno. Después, continua la etapa de deshidratación, la cual permite remover el agua presente en el gas, por medio de la solución líquida de un agente desecante que se pone en contacto con éste.

Una vez retirados estos compuestos, es posible llevar a cabo la operación del control del punto de rocío (Dew Point), en la que se remueven los hidrocarburos pesados, también conocidos como Líquidos del Gas Natural (LGN), disminuyendo así el valor del punto de rocío del gas (Guevara Luna, 2015).

En el pretratamiento se debe tener en cuenta el comportamiento de las fases del gas natural. Este se puede representar por medio de un gráfico de propiedades termodinámicas, en el cual se determina si la corriente de gas a una temperatura y presión dada consta de una sola fase o dos: líquido y gas. Sin embargo, durante el proceso se producen cambios en la presión y la temperatura que causan la condensación de gases o la evaporación de líquidos.

El comportamiento de las fases del gas natural está determinado por la composición de los gases presentes, pero se ve mayormente influenciado por la cantidad de hexano y de los demás hidrocarburos pesados (Mokhatab, Poe, & Speight, 2006).

La necesidad de esta operación radica en evitar pérdidas económicas debido al valor comercial del producto final, así como del mantenimiento de equipos. En ocasiones, los líquidos pueden ser arrastrados por la corriente de gas en cantidades significativas y esto ocasiona corrosión y daños en tuberías y equipos no diseñados para manejar dos fases, aumentos de caídas de presión y disminución en la capacidad de las líneas (Santos, 2015).

Entrando más a profundidad en la separación gas – líquido, no existe un criterio único para el diseño y establecimiento de las condiciones de operación ideales. Mas allá del dimensionamiento de un separador, existen 4 secciones fundamentales a estudiar en el diseño de este tipo de equipos, éstas se muestran en la Figura 1.

La primera sección se denomina deflector de entrada el cual permite una separación inicial, esta se realiza por medio de la entrada de la mezcla gas-líquido a alta velocidad, generando un momento del líquido alto para luego cambiar su dirección abruptamente y así lograr la separación (Santos, 2015).

Posteriormente se encuentra la sección de asentamiento del líquido, la cual tiene como función retener la mezcla durante un tiempo proporcionado en el cual el gas que se encuentra atrapado puede escapar y ascender a la sección de asentamiento gravitacional. Dicho tiempo es función de la velocidad de flujo que entra al separador, la diferencia de densidad de los fluidos y de cuanto líquido puede retener el separador (Santos, 2015).

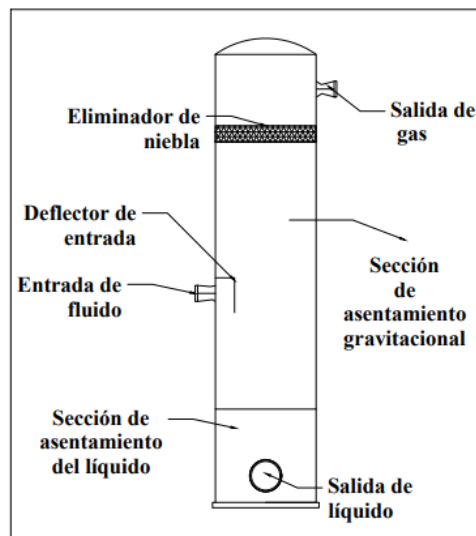
Una vez que la corriente de gas asciende, entra en la sección de asentamiento gravitacional. Aquí disminuye la velocidad del gas a la entrada permitiendo que las gotas pequeñas de líquido que han sido arrastradas (entre 100 y 140 micras), sean separadas y caigan por gravedad a la interfaz gas-líquido (Santos, 2015).

La corriente de gas que abandona el asentamiento gravitacional aun contiene gotas pequeñas de líquido menores a 100 micras, por lo que es necesario que antes de abandonar el separador, pase por una sección de coalescencia. Esta permite remover las gotas de líquido más pequeñas por medio de extractores de niebla, los cuales cuentan con gran área superficial. Estos están compuestos por elementos coalescedores que deben ser atravesados por el flujo de gas, al pasar por ellos la corriente debe cambiar de dirección efectuando rápidos movimientos que las

gotas de líquido no son capaces de seguir, estas gotas quedan retenidas en los elementos coalescedores donde se agrupan formando gotas de mayor tamaño y caen a la sección de asentamiento de líquido (Santos, 2015).

### Figura 1.

*Secciones de un separador gas-líquido.*



El correcto funcionamiento de un eliminador de neblina depende de dos funciones esenciales. En primer lugar, debe contar con una sección que le permita capturar el líquido removido, y como segunda parte debe poder drenarlo, de lo contrario este podría reincorporarse nuevamente al flujo de gas. Existen ciertas razones por las cuales puede haber arrastre de líquido en un eliminador de neblina, si las gotas de líquido son demasiado pequeñas o la velocidad de la corriente es muy baja, se disminuye la eficiencia del eliminador de impacto y evita así la captura. Por otro lado, las gotas de líquido que ya han sido capturadas pueden ser arrastradas nuevamente a la corriente (Saeid, Poe, & Mak, 2015).

Cuando la producción de gas sobrepasa el límite tolerable pueden ocurrir fallas en el separador debido a la reentrada. Esto quiere decir, que al aumentar el flujo se ejerce una mayor fuerza de arrastre sobre la película líquida del eliminador al moverse a través de este, esto conlleva a que líquido sea sacado fuera del dispositivo. En caso de ser excesivo el arrastre, el líquido retenido en el elemento coalescedor puede ser reincorporado al flujo de gas por arrastre. Al aumentar la tasa de flujo se puede beneficiar el sistema ya que la eficiencia de contacto de los eliminadores de neblina aumenta, pero a su vez también aumenta el re-arrastre, por lo que la capacidad de separación disminuye.

Existen diferentes tipos de eliminadores de neblina de acuerdo con los requerimientos de cada proceso. Entre ellos se encuentran los del tipo de malla, de paleta, los ciclónicos, entre otros.

## **2. Estado del arte**

Desde principios del siglo XX, se han desarrollado dispositivos especiales para tratar el fenómeno conocido como carryover (arrastre de líquido en la fase gaseosa). Tradicionalmente, los dispositivos más populares para reducir el arrastre de líquidos en separadores han sido los eliminadores de niebla tipo malla; éstos fueron introducidos comercialmente en 1947 y ganaron rápidamente gran aceptación para la eliminación de partículas líquidas en corrientes de gas y vapor, ya que antes de su entrada en el mercado, los dispositivos más comunes eran los deflectores de placa plana que provocaban que los gases siguieran una trayectoria tortuosa (Poppele, 1958).

Es así como a lo largo de los años han sido reemplazados gradualmente por el eliminador de niebla debido a su alta eficiencia de remoción, baja caída de presión, menor costo y compacidad, además de su amplia aplicación y eficiencia en todo tipo de procesos que involucren equipos como columnas de destilación, tambores flash, absorbedores, scrubbers y similares en prácticamente

todas las condiciones de temperatura y presión. Así mismo, como se pueden fabricar en una amplia variedad de metales, aleaciones y algunos plásticos, éstos pueden ser utilizados en condiciones de ambientes corrosivos.

Sin embargo, recientemente se han desarrollado tecnologías que han permitido un gran progreso en el diseño de los eliminadores de neblina, en la selección de materiales a partir de los cuales se fabrican y de los nuevos diseños a partir de las experiencias obtenidas de las distintas aplicaciones (Pérez, 2005).

En la actualidad la creciente demanda de realizar las operaciones más eficientes, que permitan extender el tiempo de operación de un campo maduro, como lo es el caso de estudio, se ha evidenciado investigación, desarrollo e innovación de los eliminadores de niebla, que han llevado a obtener mejoras de este sistema. A continuación, se mencionan algunos eliminadores de niebla desarrollados e implementados.

### **2.1. Eliminadores de neblina tipo malla**

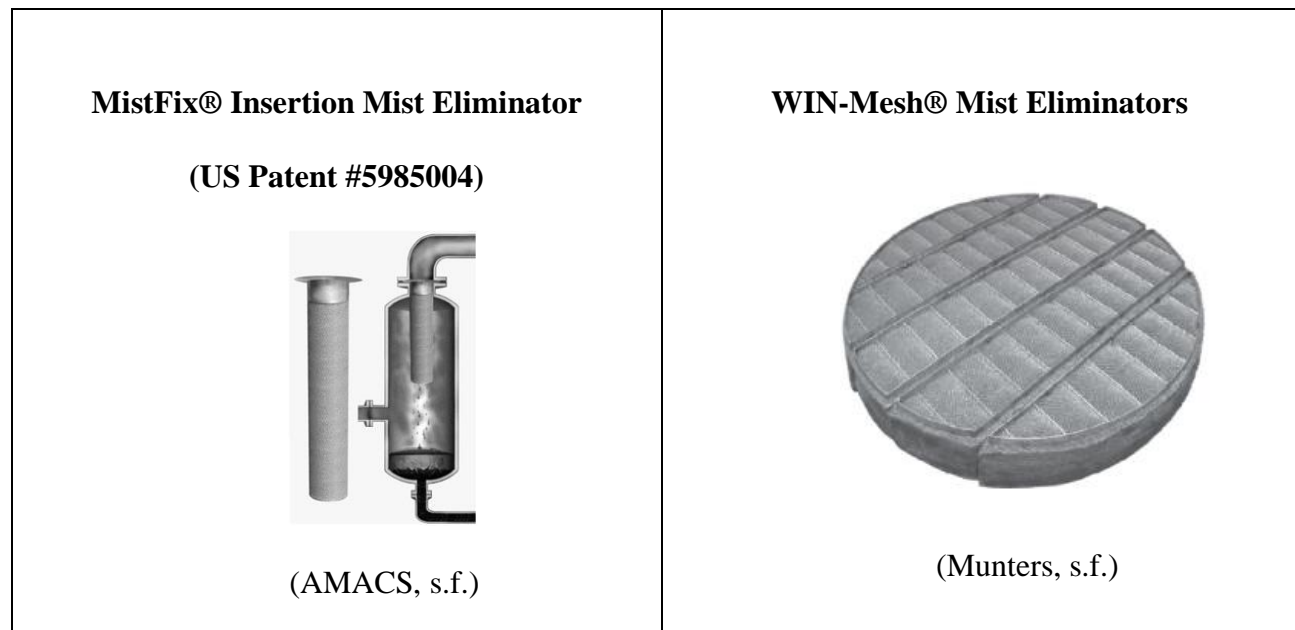
Las almohadillas de malla se utilizan para la separación de corrientes de gas/líquido con bajas fracciones de líquido. En algunas aplicaciones, se utiliza como coalescente y acondicionador previo para equipos posteriores. El propósito principal es separar las gotas de los flujos de gas. El mecanismo principal según lo declarado por (Holmes & Chen, 1984) es la impactación inercial de gotas y la intercepción directa. La primera investigación extensa para scrubbers en la industria del petróleo y gas fue puesta a disposición por (Swanborn, 1988) y su trabajo continuó siendo desarrollado por (Verlaan, 1991). Este trabajo sigue la investigación sobre la separación de gas/gotas y se centra en almohadillas de malla de alambre y el efecto de las porosidades de la malla sobre la retención de líquidos.

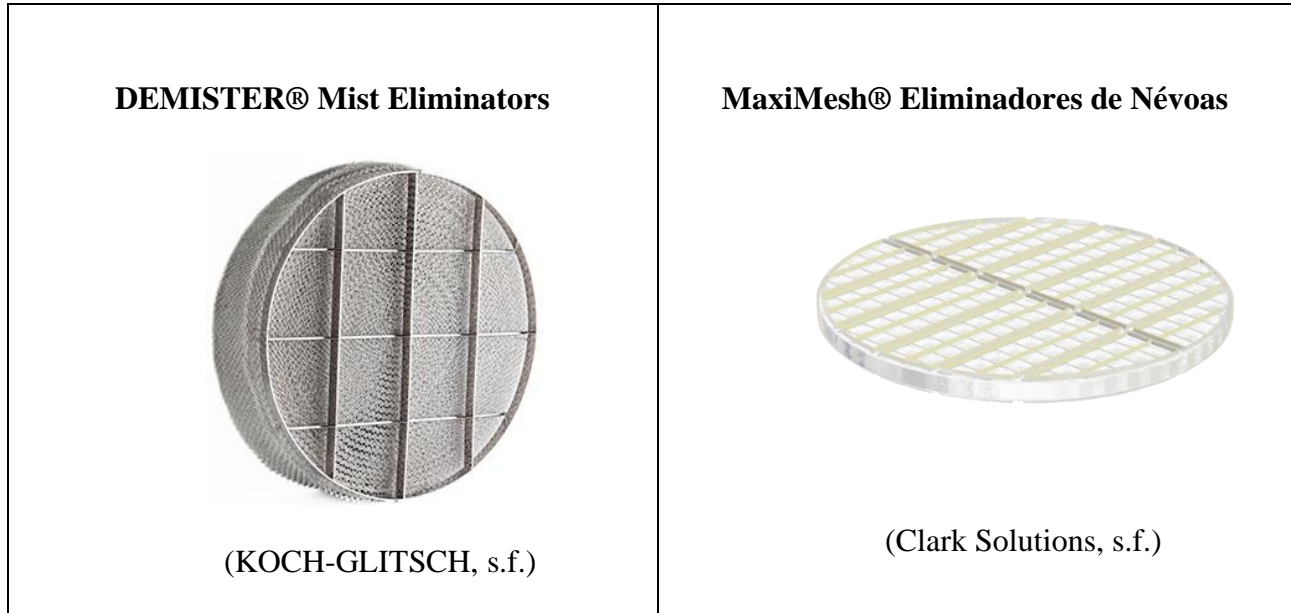
La tecnología aplicada para la fabricación de los eliminadores tipo malla convencionales, ha ido innovando a lo largo de los años. En la actualidad encontramos mallas con diferentes tipos de tejidos y materiales, que son capaces de conseguir una separación más fina de partículas.

Las mallas mejoradas, por denominarlas de un modo diferente a las tradicionales, tienen altas eficiencias de remoción y mayores flexibilidades en el flujo de diseño; además, han sido diseñadas en base a resultados experimentales, que en la mayoría de los casos producen beneficios más acordes con la práctica que aquellos encontrados a partir de bases teóricas, en lo que al tema de separación física se refiere. Aunque este tipo de eliminador de neblina es el dispositivo más utilizado en recipientes de separación mecánica en refinerías y plantas petroquímicas, las mallas siguen teniendo la desventaja del taponamiento (Pérez, 2005). En la Figura 2 se presentan los eliminadores de malla encontrados actualmente.

### Figura 2.

*Eliminadores de niebla actuales de tipo malla.*





## 2.2. Eliminadores de neblina tipo vanes o paletas

Los eliminadores (paquete de paletas) utilizan hojas relativamente espaciadas dispuestas para proporcionar trayectoria de flujo gas sinusoidales o en zigzag. Los cambios en la dirección del flujo de gas combinados con la inercia de las gotas de líquido arrastradas provocan el impacto de las gotitas sobre la superficie de la placa, seguido de coalescencia y drenaje del líquido a la sección de recolección de líquido del separador (Saeid, Poe, & Mak, 2015).

Al igual que con los eliminadores de niebla de tipo malla, la tecnología aplicada para fabricar los eliminadores de neblina tipo paleta convencionales también ha ido mejorando.

Actualmente se encuentran vanes de alta eficiencia que utilizan bolsillos, simples o dobles, para promover el drenaje de líquidos y conseguir una separación de partículas más eficiente.

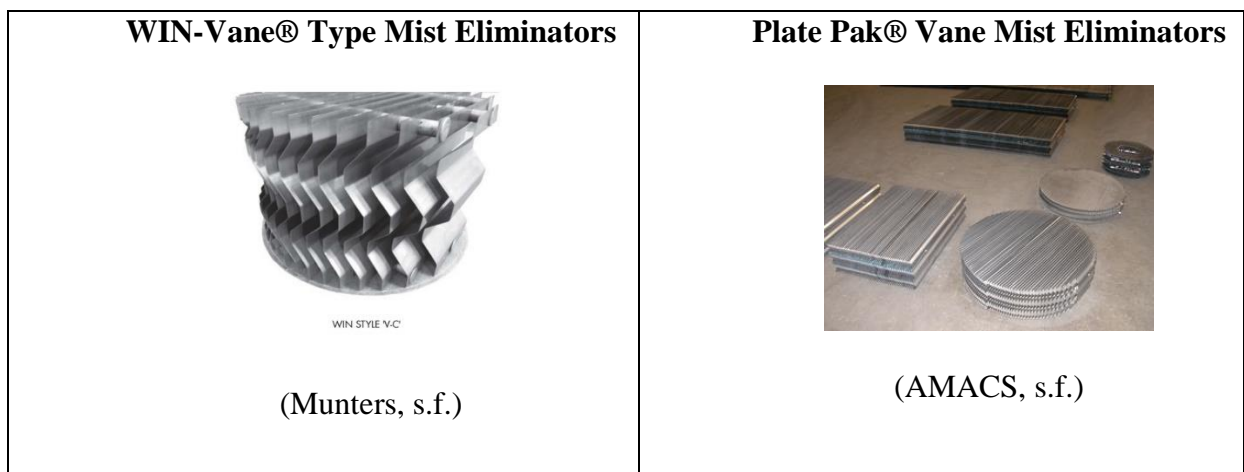
Las paletas con cavidades permiten un mayor paso de gas por área de flujo debido a un drenaje mejorado, pero no se usan típicamente en servicios altamente ensuciadores. La capacidad



de la paleta se reduce para aplicaciones de flujo ascendente vertical en relación con el flujo horizontal (Saeid, Poe, & Mak, 2015).

Los eliminadores de neblina tipo vanes, permiten el manejo de líquidos más viscosos y mayores velocidades que las mallas, pero su principal desventaja es su alto costo y sensibilidad a variaciones en el flujo (Pérez, 2005). En la Figura 3 se presentan los eliminadores de paleta encontrados actualmente.

### Figura 3.

*Eliminadores de niebla actuales de tipo paletas.*



<p><b>Munters - Model DPV - Double Pocket</b></p> <p><b>Vane Type Separator</b></p>  <p>(Munters, s.f.)</p>	<p><b>VDP-04: Hook blade vane demister pad</b></p>  <p>(BOEGGER- Industech Limited, s.f.)</p>
--	--

### 2.3. Eliminadores de neblina ciclónicos

Este tipo de eliminadores utilizan la fuerza centrífuga para separar las gotas de líquido y los sólidos de la fase gaseosa según la diferencia de densidad. Se pueden lograr fuerzas G muy altas (múltiplos de gravedad), lo que permite la eliminación eficiente de pequeñas gotas. La principal ventaja de los eliminadores de neblina ciclónicos es que proporcionan una buena eficiencia de eliminación a alta presión de funcionamiento y alta capacidad de gas. Por lo general, esto permite el diámetro de recipiente más pequeño posible para un flujo de gas dado. Para crear las altas fuerzas G requeridas, los separadores ciclónicos generalmente tienen caídas de presión significativamente más altas que otros mecanismos de separación. La capacidad de reducción variará entre diseños y es una función de la caída de presión permitida en el diseño. Si se permite una mayor caída de presión, se puede lograr una mayor reducción con el riesgo de reducir el rendimiento de separación (Saeid, Poe, & Mak, 2015).




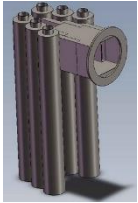
Hay muchos tipos de dispositivos centrífugos que se utilizan en la industria para separar líquidos y sólidos arrastrados de una corriente de gas. Las dos configuraciones más comunes

empleadas son los ciclones de flujo inverso y los ciclones de flujo axial. En los ciclones convencionales de flujo inverso, cada elemento de ciclón consta de una entrada tangencial, una sección inferior en forma de cono y una salida de gas central superior. El gas se arremolina hacia abajo a través del anillo entre las paredes interior y exterior. Luego fluye, aun girando, hacia el tubo interior y sale por la parte superior. En los ciclones de flujo axial, el gas húmedo fluye hacia arriba a través de un elemento de remolino que induce un flujo giratorio. La alta velocidad tangencial arroja las gotas de líquido a las paredes del tubo cilíndrico, donde forman una fina película. La película líquida sale a través de ranuras en las paredes del ciclón, junto con una pequeña cantidad de gas, y luego drena al fondo de la unidad. Se pueden utilizar varias técnicas para recuperar líquidos del gas de purga (Saeid, Poe, & Mak, 2015).

Para lograr un funcionamiento eficiente en el espacio más compacto, y para la mejor recuperación de la energía consumida, los sistemas de ciclón para la separación gas-líquido se ensamblan en “haces” multiciclónicos. El paquete completo se considera el dispositivo separador ciclónico. En la Figura 4 se presentan los eliminadores de neblina ciclónicos encontrados actualmente.

**Figura 4.**

*Eliminadores de niebla actuales de tipo ciclón.*

<p><b>VORSOMAX® Cyclone Mist Eliminator</b></p>  <p>(KOCH-GLITSCH, s.f.)</p>	<p><b>4G-FD® Demisting Cyclone</b></p>  <p>(zeta-pdm, s.f.)</p>
<p><b>VersiSwirl™</b></p>  <p>(SULZER, s.f.)</p>	<p><b>GIRZ cyclonic inlet device</b></p>  <p>(SULZER, s.f.)</p>

#### 2.4. Eliminadores de neblina combinados

Los diseños combinados pueden aumentar la eficiencia del separador, ampliar el rango de reducción sobre el que funciona o permitirle manejar altas cargas de líquido. Los diseños combinados se utilizan para reducir el costo de los separadores verticales de alta y baja presión donde la velocidad del gas controla el tamaño del recipiente.

Los diseños de combinación de malla o paletas inundados ofrecen una mayor reducción, ya que a baja velocidad el elemento inundado proporciona capacidades de desempañado cuando el dispositivo aguas abajo puede ser ineficaz debido a la baja velocidad.

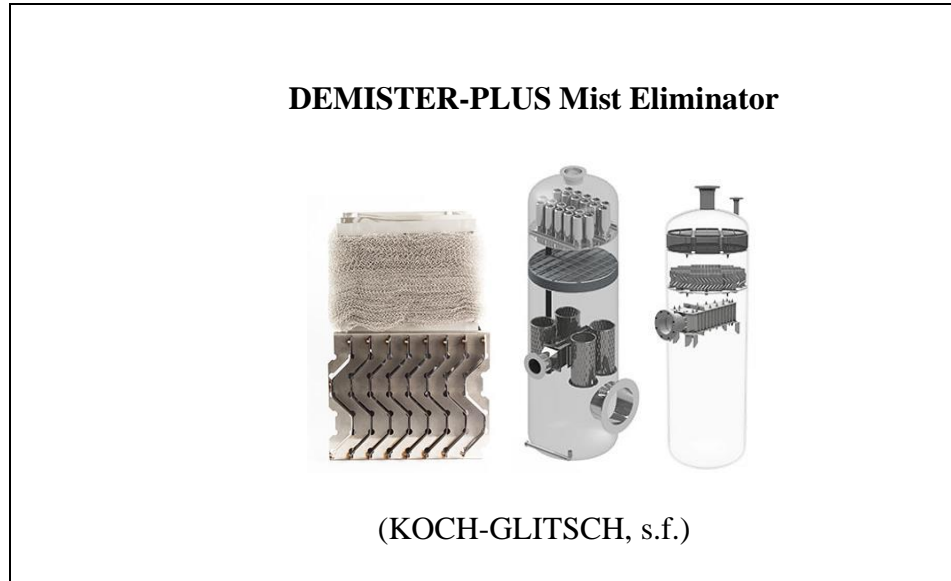
En los últimos años, se ha desarrollado un único dispositivo de combinación de malla-paleta de material compuesto que puede demostrar que tiene las ventajas de los dos dispositivos separados en ciertas aplicaciones.

Los diseños de combinación típicos son:

- Almohadilla de malla inundada (malla coalescente) seguida de paletas en flujo vertical u horizontal; Reduce el diámetro de la torre de separación en comparación con la almohadilla de malla y mantiene una alta eficiencia
- Un paquete de paletas seguido de una almohadilla de malla; Permite un servicio potencialmente ensuciador y mantiene una alta eficiencia de la almohadilla de malla
- Flujo vertical con paletas inundadas o plataforma de malla, seguido de múltiples ciclones axiales; Permite tasas de líquido más altas con una mayor reducción con una alta eficiencia continua sobre los ciclones. En la Figura 5 se presentan los eliminadores de neblina combinados encontrados actualmente.

**Figura 5.**

*Eliminadores de niebla actuales de tipo combinados.*



### 3. Objetivos

#### 3.1. Objetivo general

Realizar un estudio conceptual de los sistemas de separación por coalescencia para corrientes de gas natural aplicado al caso de estudio.

#### 3.2. Objetivos específicos

- ✓ Realizar una conceptualización de los sistemas de separación por coalescencia para la remoción de hidrocarburos pesados del gas natural, mediante la revisión bibliográfica, con el fin de evidenciar los avances y desarrollos tecnológicos en este campo.
- ✓ Caracterizar el actual sistema de separación del GASA COMBUSTIBLE PY, mediante el levantamiento de información de campo y los documentos de ingeniería existentes, permitiendo identificar las ventajas y limitaciones que tiene el separador vertical en estudio.

- ✓ Elaborar una propuesta de mejora mediante la selección y diseño de facilidades adaptables al actual sistema de recuperación de líquidos del GAS COMBUSTIBLE PY, que permitan aumentar su eficiencia en la remoción de hidrocarburos licuables.
- ✓

#### **4. Descripción metodológica**

El estudio de los sistemas de separación por coalescencia para corrientes de gas natural se llevó a cabo a partir de la ruta metodológica planteada para dar solución a los objetivos específicos establecidos. La metodología de este proyecto se divide en tres etapas, tal como se muestra en la Figura 6.

En la etapa I, se realizó una búsqueda de las bases de datos proporcionadas por la Universidad Industrial de Santander, en las cuales se realizó la investigación sobre los diferentes sistemas de separación y arreglos mecánicos existentes, los cuales pueden ser utilizados para el caso de estudio. La selección bibliográfica se basó principalmente en las publicaciones encontradas en la base de datos ScienceDirect. Se inició por una búsqueda general sobre el tema de sistemas de separación de gases, en la que se encontraron 491 publicaciones. Para clarificar la búsqueda y acoplarla de mejor manera a nuestras necesidades, se filtraron los documentos seleccionando las áreas que se adaptarían a nuestro campo de estudio y adicionalmente aquellos más citados. Además, se complementó con publicaciones y textos referentes al tema que fueron encontrados en bases de datos diferentes y/o proporcionados por el director. A partir de la información recopilada de las bases de datos, se realizó el estado del arte del presente trabajo, el cual se encuentra detallado en el capítulo 2.

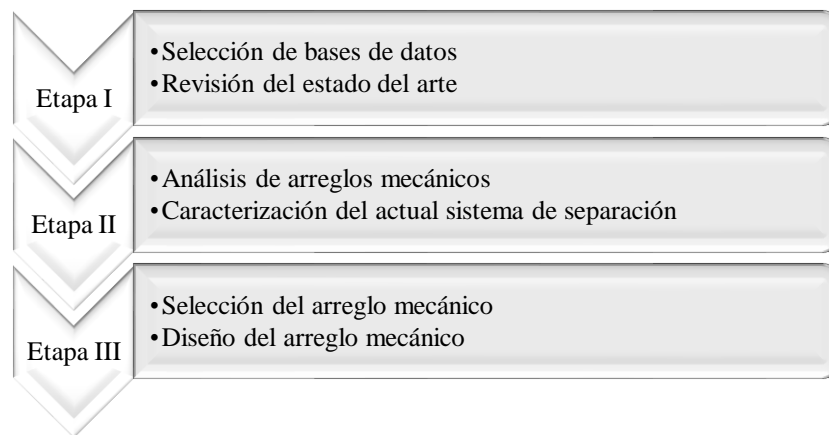
Posteriormente, en la etapa II, se revisó el estado del arte y se hizo un análisis sobre las cualidades de dichos arreglos para la conveniencia en la instalación del sistema de separación del

caso de estudio. Además, con el apoyo de la compañía que proporcionó el caso de estudio, se realizó la caracterización actual del sistema de remoción de los hidrocarburos licuables presentes en la corriente de “GAS COMBUSTIBLE PY” para lo cual se efectuó el levantamiento de información técnica asociada a la operación, diseño y actuales facilidades que lo conforman.

Finalmente, en la etapa III después de llevar a cabo el análisis correspondiente se procedió a seleccionar el arreglo mecánico que a consideración era el más efectivo en la recuperación de hidrocarburos pesados en la corriente de gas del caso de estudio. Una vez seleccionado el arreglo mecánico se realizó el dimensionamiento para poder implementarlo en el sistema de separación ya existente.

### Figura 6.

*Diagrama de flujo del proyecto.*



## 5. Resultados

### 5.1. Etapa II

#### 5.1.1. *Análisis de arreglos mecánicos*

Para el análisis de los arreglos mecánicos encontrados mediante la revisión del estado del arte, se tomaron en cuenta los principales factores, expuestos por (Bothamley, 2013), de los cuales depende el rendimiento de estos arreglos, para su apropiada selección y diseño según las diferentes situaciones en donde son aplicados. A continuación, se presentan dichos factores:

- ***Eficiencia de eliminación de gotas***, en donde se mide la capacidad de eliminar las gotas más pequeñas en un rango de tamaño de partículas, lo que corresponde a una menor penetración de las gotas a través del eliminador de niebla y, por ende, a un menor arrastre de líquido al separado.
- ***Capacidad de gas***, la cual suele estar determinada por la velocidad máxima permitida antes de que el re-arrastre se vuelva excesivo.
- ***Manejo de líquidos***, se refiere a la cantidad de carga de líquido arrastrado (gal/min/ft<sup>2</sup>) que el eliminador de niebla puede manejar antes de que el rendimiento de la separación se degrade sustancialmente debido a la reentrada.
- Las consideraciones secundarias incluyen el rendimiento de reducción, la tendencia al ensuciamiento, costos de instalación y caídas de presión.

Una vez se tiene conocimiento de los factores claves para la buena selección de los arreglos mecánicos en los diferentes escenarios posibles, se procedió a analizar dichos factores en cada uno de los tipos de eliminadores de niebla estudiados con anterioridad, y se obtuvieron los siguientes datos.

Eliminador de niebla de malla de alambre vertical:

- **Aplicación:** Eliminación de niebla del gas o desempañado
- **Características:**
  - Alta relación de rechazo (factor 4)
  - Alta capacidad de manejo de slug
  - Eficiencia de remoción de líquido > 98%
  - Sensible a las incrustaciones
  - Baja caída de presión
  - Eficiencia de un 99% para partículas de 7 a 10 micrones.
- **Uso recomendado:**
  - Eliminar niebla con una carga moderada de líquido en forma de gotas donde sea necesario el manejo del slug
- **No recomendado:**
  - En servicios de incrustaciones fuertes (cera pesada, asfáltenos, arena, hidratos)
  - Para líquidos donde el requisito de desgasificación determina el diámetro del recipiente

Eliminador de niebla de paquete de paletas:

- **Aplicación:** Eliminación de niebla del gas o desempañado
- **Características:**
  - Eficiencia de remoción del líquido > 96%
  - Moderada relación de rechazo (factor 3)
  - Apto para procesos con suciedad leve.
  - No apto para presiones superiores a 700 psig

- Sensible a slug líquido
- Baja caída de presión
- Eficiencia de 99% para partículas de 20 a 40 micrones
- **Uso recomendado:**
  - Para un servicio de eliminación de niebla típico
  - Donde el eliminador de malla se puede ensuciar (crudos cerosos, unidades de recuperación de sulfuro)
  - Reducir el tamaño del separador y por ende el costo de éste.
- **No recomendado:**
  - En servicios con incrustaciones fuertes (cera pesada, asfáltenos, arena, hidratos)
  - Para líquidos viscosos donde la desgasificación determina el diámetro del recipiente
  - Si la presión excede los 700 psig

Eliminador de niebla tipo ciclón convencional:

- **Aplicación:** Eliminación de niebla del gas o desempañado
- **Características:**
  - Alta capacidad de manejo de gas
  - Eficiencia de remoción del líquido > 96%
  - Índice de rechazo limitado (factor 2)
  - Caída de presión alta
  - Mayor tolerancia a las incrustaciones
  - Alta eficiencia para gotas entre 10 a 20 micrones
- **Uso recomendado:**

- Típicamente para uso en un ambiente de ensuciamiento (formación de coque) y donde se requiere eficiencia alta
- Se emplean cada vez más para separadores nuevos, grandes y de alta presión, en los que se pueden lograr ahorros significativos reduciendo el diámetro y el peso del recipiente. Son más competitivos en cuanto a costos operando a alta presión (más de 600 psig)
- **No recomendado:**
  - Donde no se tolera una caída de presión alta
  - Este sistema posee mayor complejidad y altos costos

Eliminador de niebla de malla inundada seguido de paquete de paletas:

- **Aplicación:** Eliminación de niebla del gas o desempañado
- **Características:**
  - Alta relación de rechazo (factor 4 o superior)
  - Alta capacidad de manejo de slug
  - Eficiencia de remoción del líquido > 96%
  - Sensible a las incrustaciones
  - Baja caída de presión
- **Ventajas:**
  - Reduce el diámetro del separador en comparación con un sistema de solo malla y mantiene la alta eficiencia a tasas de gas altas y bajas, la malla funciona como coalescente para mejorar la eficiencia de las paletas aguas abajo.

Eliminador de niebla de paquete de paletas seguido de malla:

- **Aplicación:** Eliminación de niebla del gas o desempañado

- **Características:**
  - Alta relación de rechazo (factor 4 o superior)
  - Alta capacidad de manejo de slug
  - Eficiencia de remoción del líquido > 98%
  - Sensible a las incrustaciones
  - Baja caída de presión
- **Ventajas:**
  - Mejor manejo con cargas de líquido más altas que un sistema de solo paletas y minimiza el efecto de arrastre de sólidos. Las paletas eliminan las gotas de gran tamaño y la malla elimina las gotas más pequeñas sin necesidad de inundarse ni ensuciarse.

Eliminador de niebla de malla o paleta seguido de un ciclón:

- **Aplicación:** Eliminación de niebla del gas o desempañado
- **Características:**
  - Alta relación de rechazo (factor 4 o superior)
  - Alta capacidad de manejo de slug
  - Eficiencia de remoción del líquido > 98%
  - Sensible a las incrustaciones
  - Alta caída de presión
- **Ventajas:**
  - Esta configuración ubica un paquete de paletas o malla operando de manera inundada los cuales funcionan como coalescentes para mejorar la eficiencia

de los ciclones aguas abajo, por otro lado, es mayor la tolerancia al ensuciamiento que los otros sistemas combinados.

### **5.1.2. Caracterización del actual sistema de separación caso de estudio**

Con el apoyo de la compañía que brindó el caso de estudio, se realiza el levantamiento de información técnica asociada a la operación, diseño y actuales facilidades que conforman el sistema de remoción de los hidrocarburos licuables presentes en la corriente de “GAS COMBUSTIBLE PY”.

La corriente de gas a tratar en el separador a rediseñar proviene de un campo maduro de producción que se ha denominado “CAMPO PY” a lo largo del presente trabajo. Este se encuentra ubicado en el municipio de Sabana de Torres en el departamento de Santander. Dicha corriente es entregada a una presión de 300 psig, con una temperatura alrededor de 80 °F la cual puede oscilar entre 75 °F y 85 °F. El flujo de gas ingresa al separador por medio de una boquilla con diámetro nominal de 4" y rating 600 a una tasa de 1 millón de pies cúbicos estándar por día (MMSCFD). Una vez se ha tratado dicha corriente, sale del separador por otra boquilla con diámetro nominal de 3" y cédula 80 (Ver apéndice A, B y C).

Actualmente el separador cuenta con un perímetro externo de 153 cm y posee un espesor de 5/8", el cual tiene la capacidad de recuperar aproximadamente 1000 galones de condensados por día.

Con el fin de conocer la composición de la corriente de gas natural que ingresa al separador, se realizó un análisis composicional a la corriente de gas denominada “GAS COMBUSTIBLE PY” por medio de la técnica de caracterización de cromatografía de gases. A su vez, se evaluaron las propiedades fisicoquímicas de la corriente a partir de la composición obtenida. Dicho estudio fue realizado por la empresa CDT y sus resultados se presentan a continuación en las tablas 1 y 2:

**Tabla 1.***Composición de la corriente "GAS COMBUSTIBLE PY".*

<b>Componente</b>	<b>Composición [cmol/mol]</b>	<b>Desviación Estándar [cmol/mol]</b>	<b>±U (Incertidumbre) [cmol/mol]</b>	<b>Factor de cobertura [k]</b>
<b>Oxígeno**</b>	-	-	-	-
<b>Nitrógeno</b>	0,362	0,0050	0,0650	2,09
<b>Metano</b>	65,291	0,0750	0,2300	2,36
<b>Dióxido de Carbono</b>	14,653	0,0350	0,1700	1,99
<b>Etano</b>	8,504	0,0570	0,1300	2,30
<b>Propano</b>	5,696	0,0310	0,0870	2,57
<b>Isobutano</b>	1,183	0,0140	0,0280	2,26
<b>n-Butano</b>	2,401	0,0240	0,0460	2,36
<b>Isopentano</b>	0,702	0,0070	0,0200	2,02
<b>n-Pentano</b>	0,650	0,0120	0,0230	2,78
<b>n-Hexano e Isómeros</b>	0,353	0,0015	0,0050	2,36
<b>n-Heptano e Isómeros</b>	0,159	0,0014	0,0008	2,16
<b>n-Octano e Isómeros</b>	0,046	0,0009	0,0008	2,18
<b>n-Nonano e Isómeros</b>	-	-	-	-
<b>n-Decano e Isómeros</b>	-	-	-	-
<b>n-Dodecano e Isómeros</b>	-	-	-	-
<b>n-Undecano e Isómeros</b>	-	-	-	-

\*\*Componente por debajo del límite del método (Establecido como 0,0005 % mol)

**Tabla 2.***Propiedades fisicoquímicas de la corriente "GAS COMBUSTIBLE PY".*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor Calculado</b>	<b>±U (Incertidumbre) Absoluta</b>	<b>Factor de cobertura</b>
<b>Poder Calorífico Superior (real)</b>	BTU/ft <sup>3</sup>	1136,1	6,8	2,00
<b>Densidad (real)</b>	lb/ft <sup>3</sup>	0,06692	0,00041	2,00

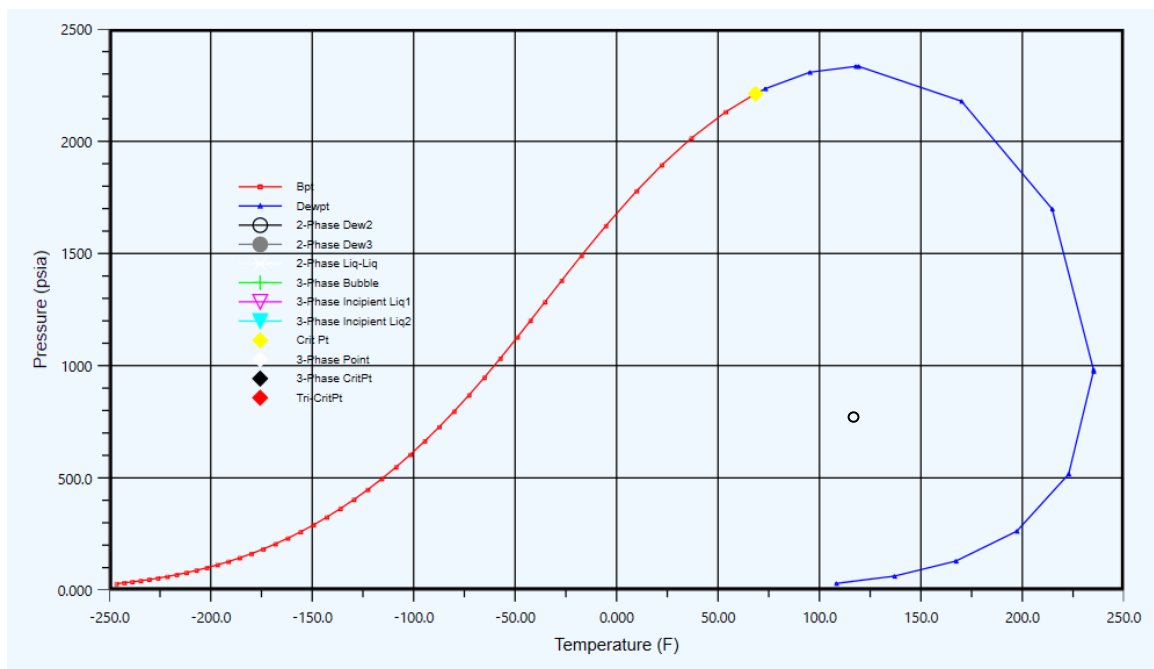
<b>Gravedad Específica (real)</b>	---	0,8792	0,0054	2,00
<b>Factor de compresibilidad</b>	---	0,9959	0,0011	1,97
<b>Peso Molecular</b>	---	25,37	0,2	1,98
<b>Índice de Wobbe</b>	BTU/ft <sup>3</sup>	1212	10	1,98

### 5.1.2.1. Análisis del comportamiento de fases.

Tomando el análisis composicional de la corriente de gas del caso de estudio realizado en mayo del 2019, se generó la envolvente del gas, la cual se muestra en la Figura 7. Para esto se hizo uso del software Aspen HYSYS aplicando como paquete de propiedades termodinámico el modelo de Peng-Robinson. En ésta se puede observar que las condiciones bajo las cuales se puede esperar la condensación de líquidos son de 1356 psig y 223 °F.

**Figura 7.**

*Envolvente del gas de entrada “GAS COMBUSTIBLE PY”.*



### 5.1.2.2. Eficiencia actual del sistema de separación.

Para determinar la eficiencia actual del sistema de separación se tuvo en cuenta el concepto de GPM (galones de líquido por cada mil pies cúbicos), por medio del cual se identifica cuál es la riqueza del gas que ingresa al separador y que cantidad teórica de líquidos pueden obtenerse.

Se trabajó con la cromatografía del gas que ingresa al separador y la cromatografía del gas que sale, para obtener los GPM condensables que se pueden observar en la Tabla 3, y así realizar el cálculo de la eficiencia.

**Tabla 3.**

*GPM Condensables.*

<b>Componente</b>	<b>Fracción molar entrada</b>	<b>GPM entrada</b>	<b>Fracción molar salida</b>	<b>GPM salida</b>
<b>C1</b>	0,6213	-	0,6518	-
<b>C2</b>	0,0669	-	0,0682	-
<b>C3</b>	0,0528	1,4503	0,0488	1,3405
<b>iC4</b>	0,0121	0,3949	0,0098	0,3198
<b>nC4</b>	0,0268	0,8429	0,0203	0,6385
<b>iC5</b>	0,0122	0,4454	0,0079	0,2884
<b>nC5</b>	0,014	0,5059	0,0083	0,2999
<b>C6</b>	0,0187	0,7670	0,0111	0,4553
<b>C7</b>	0,0177	0,8145	0,0123	0,5660
<b>C8</b>	0,0079	0,4034	0,0081	0,4137
<b>C9</b>	0,0016	0,0899	0,0027	0,1516
<b>C10</b>	0,0004	0,0034	0,0004	0,0034
<b>CO2</b>	0,1351	-	0,1379	-
<b>N2</b>	0,0125	-	0,0127	-
<b>Total</b>		5,7177		4,4771

Al realizar el proceso, se obtuvo que la eficiencia de separación actual es aproximadamente de 21,69%, es decir, con el sistema de separación actual se logran extraer 1.240 galones por día para un flujo de 1.2 MMSCFD.

## 5.2. Etapa III

### 5.2.1. Selección del arreglo mecánico

Para la selección del arreglo mecánico que a consideración será más efectivo en la recuperación de hidrocarburos pesados en la corriente de gas del caso de estudio, se tienen en cuenta una serie de factores, mostrados en la Tabla 4, que subordinarán la elección de éste.

**Tabla 4.**

*Cuadro comparativo de separadores verticales de gas y líquido.*

Tipo de separador	Sin internos	Almohadilla de malla	Paquete de paletas	Ciclones de flujo axial	Malla/Paleta	Paleta/Malla	Malla de inundación/ Multi-ciclón
<b>Manipulación de gas</b>							
<b>Capacidad</b>	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto
<b>Capacidad de rechazo</b>	$\infty$	4:01	2-3: 1	2:01	4: 1 o superior	4: 1 o superior	4: 1 o superior
<b>Eficiencia de eliminación de líquidos</b>							
<b>Eficiencia general</b>	Bajo	Muy alto	Moderado	Alto	Moderado	Alto	Alto
<b>Capacidad de manejo de líquidos</b>							
<b>Gotas</b>	Alto	Alto	Moderado	Alto	Alto	Alto	Alto
<b>Tolerancia de ensuciamiento</b>							
<b>Particulado</b>	Muy alto	Bajo	Moderado	Moderado	Bajo	Bajo	Bajo
<b>Caída de presión</b>	Muy bajo	Muy bajo	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Alto
<b>Financiero</b>							
<b>Costos</b>	Bajo	Moderado	Moderado	Alto	Moderado	Moderado	Muy alto

Mediante el análisis de cada uno de los arreglos mecánicos mencionados, se concluye que el sistema de eliminación de niebla óptimo para nuestro caso de estudio es la combinación de un arreglo de paletas seguido por uno de malla. Se seleccionó esta configuración porque al tener una torre de separación existente, se puede adaptar de mejor manera dicho sistema debido a que la incorporación de paletas disminuye el diámetro requerido del acople que se realizará a diferencia de un sistema de solo malla. Por otro lado, aumenta el manejo de cargas de líquido y minimiza el arrastre de sólidos ya que las paletas eliminan las gotas de gran tamaño permitiéndole a la malla aguas abajo eliminar las gotas más pequeñas sin necesidad de inundarse, evitando así el re-arrastre de líquidos y, además, disminuyendo el ensuciamiento de la malla evitando así posibles mantenimientos futuros permitiendo alargar la vida útil del sistema. Todo lo anteriormente mencionado genera una disminución de costos para el nuevo sistema de separación y un aumento en las utilidades de la empresa ya que se condensarán más combustibles licuables los cuales tienen un valor en el mercado.

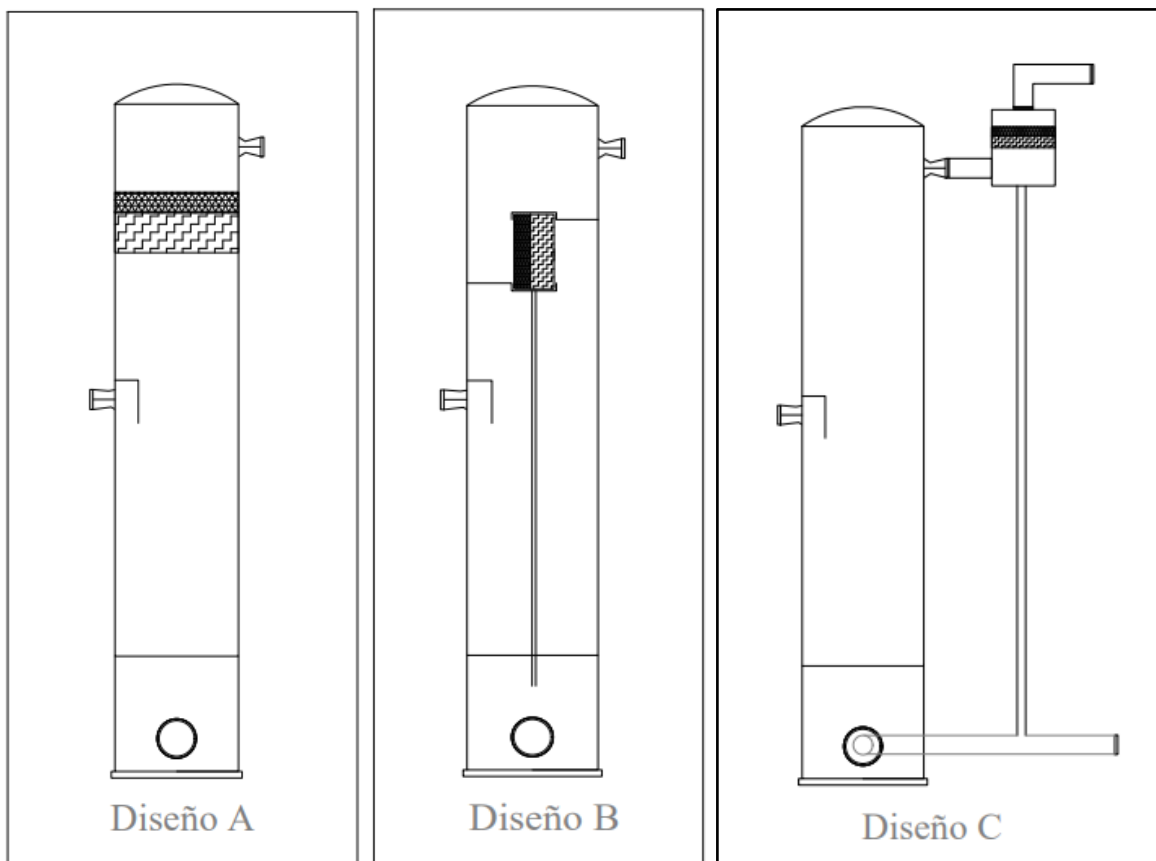
### ***5.2.2. Diseño del arreglo mecánico***

Una vez seleccionado el tipo de arreglo mecánico a implementar, se analizan las diferentes variables de diseño en conveniencia para la implementación del mismo en el sistema de separación ya existente. Para esto, se analizaron factores como la instalación interna del dispositivo, es decir, la ubicación en el interior de la torre y arreglos o modificaciones para poder implementarlos. Además, que beneficios económicos conlleva este diseño en comparación con diferentes diseños alternativos como lo podría ser la creación de un acople a la salida de la boquilla de gas como un elemento adicional del sistema.

En la Figura 8, se presentan las tres posibles alternativas de diseño en base al arreglo mecánico seleccionado con anterioridad.

**Figura 8.**

*Alternativas de diseño*



En el primer caso se presenta un diseño del arreglo de combinación de paletas-malla, el cual encuentra ubicado en el separador de forma horizontal de tal manera que el flujo atraviesa dicho sistema verticalmente, siendo este el más común. Este diseño presenta una ventaja con respecto a los otros, ya que, no es necesario la implementación de un sistema de acoples para

modificar la trayectoria del flujo para el ingreso al eliminador de niebla porque debido a la gravedad generada por la altura de la torre, el flujo de gas es vertical.

Por el contrario, el segundo diseño al estar ubicado de manera horizontal, sí necesita de la implementación de unas placas que permitan el cambio de sentido para desviar el flujo horizontalmente de tal forma que logre ingresar al sistema de arreglos, este diseño presenta ventajas al tener una altura del eliminador mayor que el ancho, dado que permite un diámetro de recipiente más pequeño que el primer diseño del eliminador de flujo vertical, y en este caso, como el separador existente tiene un diámetro pequeño, este se adapta de manera óptima puesto que al ser más compacto cumple con el espacio adecuado para permitir la correcta distribución del gas al ser necesaria su desviación. Esto genera que el sistema sea de menor costo, además de tener una mayor eficiencia al momento de la separación de las gotas. En los dos casos, se necesita realizar una modificación de la torre ya existente para poder implementar dichos sistemas, lo cual conlleva a un aumento en los costos de instalación, así como la pérdida económica para la empresa al poner en pausa la torre de separación.

Por lo anterior, se presenta la tercera alternativa de diseño, que contempla realizar un acople externo de un dispositivo que contenga los eliminadores de niebla. Al igual que el primero, el arreglo mecánico se encuentra ubicado de manera horizontal dentro del dispositivo que lo contiene y está conectado a la salida del gas de la torre de separación. Este diseño genera mayores facilidades de instalación al no tener que hacer modificaciones internas a la torre ya existente, evitando la parada de dicho sistema y la interrupción del flujo normal de la planta, además, puede ser diseñado exactamente a las necesidades reales sin necesidad de tener una predisposición del sistema antiguo como lo puede ser el diámetro de la torre o la altura que el sistema posee, ya que lo que se busca es la mayor facilidad y beneficio del acople de dichos arreglos mecánicos. Sin

embargo, hay que tener en cuenta que es necesario agregar nuevas conexiones para conectar los hidrocarburos recuperados del nuevo dispositivo con los recolectados de la torre de separación lo que aumenta el costo del mismo.

## 6. Conclusiones

A través del estudio conceptual que se realizó de los sistemas de separación por coalescencia para corrientes de gas natural, podemos observar cómo ha avanzado la ingeniería en este aspecto a través del desarrollo de nuevos mecanismos y soluciones que nos brindan mayores rendimientos a menor costo de diseño, construcción y operación. Un claro ejemplo, es el sistema de separación del caso de estudio, el cual fue construido en 1990 y no cuenta con ningún arreglo mecánico interno que aumente la coalescencia para una mayor separación de los hidrocarburos pesados del gas natural.

Gracias a este estudio se analizaron las diferentes alternativas para la implementación de arreglos mecánicos al sistema ya existente, con el fin de mejorar su eficiencia. Es así como se discuten las ventajas y desventajas de cada una de las alternativas y se concluye que, un arreglo de combinación paletas/malla sería la mejor opción para nuestro sistema al necesitar un menor diámetro, permitir mayor carga de líquidos y minimizar el arrastre de sólidos, además de evitar el ensuciamiento de la malla, permitiendo así, una mayor vida útil del sistema. Con todo esto, el nuevo sistema de separación generará mayores utilidades a la empresa, ya que se condensarán más combustibles licuables para su posterior venta y disminuirán los gastos de mantenimiento.

En cuanto al diseño se estudiaron tres alternativas teóricas en las que se analizaron las ventajas y desventajas dependiendo del modo de implementación del arreglo mecánico al sistema de separación. Se concluye que, el segundo diseño o diseño B es el más viable, dado que, al tener

un flujo de gas horizontal al conjunto de paletas-malla se observa una menor necesidad de diámetro de torre debido a que el sistema paletas-malla requiere ser más alto que ancho. Esto mencionado con anterioridad conviene, ya que el diámetro de la torre es pequeño y, además, se tiene una altura suficiente para su implementación, todo esto generará un menor costo de implementación y mayor eficiencia al momento de separar los líquidos.

## **7. Recomendaciones**

Se recomienda seguir con el estudio de los diferentes arreglos mecánicos dado que, es un tema en el cual se pueden hacer mayores desarrollos y motivar a empresas con mecanismos antiguos a implementar dichos arreglos y así, evitar el desperdicio de elementos valiosos, como lo son los hidrocarburos pesados, y, generar así, mayor aprovechamiento de los recursos y menor contaminación ambiental.

La segunda recomendación es que si se desea implementar dichos sistemas se requiere un estudio tanto técnico como económico este trabajo, debido a que estuvo planificado como un estudio conceptual de los nuevos sistemas que permitirían aumentar la coalescencia de nuestro caso de estudio.

### Referencias bibliográficas

- AMACS. (s.f.). *AMACS - PROCESS TOWER INTERNALS*. Obtenido de <https://www.amacs.com/es/mist-eliminators/mist-fix/>
- AMACS. (s.f.). *AMACS - PROCESS TOWERS INTERNALS*. Obtenido de <https://www.amacs.com/mist-eliminators/vanes/>
- BOEGGER- Industech Limited. (s.f.). *demister pads*. Obtenido de <https://www.demisterpads.com/demister-pad/vane-demister-pad.html>
- Bothamley, M. (21 de July de 2013). Gas/Liquid Separators: Quantifying Separation Performance - Part 1. *Journal of Petroleum Technology*. Obtenido de <https://jpt.spe.org/gasliquid-separators-quantifying-separation-performance>
- Bothamley, M. (9 de September de 2013). Gas/Liquid Separators: Quantifying Separation Performance - Part 2. *Journal of Petroleum Technology*. Obtenido de <https://jpt.spe.org/gasliquids-separators-part-2-quantifying-separation-performance>
- Bothamley, M. (15 de Noviembre de 2013). Gas/Liquid Separators: Quantifying Separation Performance - Part 3. *Journal of Petroleum Technology*. Obtenido de <https://jpt.spe.org/gasliquids-separators-part-3-quantifying-separation-performance>
- Clark Solutions. (s.f.). *Clark Solutions*. Obtenido de <https://www.clarksolutions.com.br/es/produto/eliminadores-de-nevoas-maximesh/>
- Florez L., J. H. (2019). *REJUVENECIMIENTO DE CAMPOS MADUROS APLICANDO ALTERNATIVAS TECNOLOGICAS*. Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander, Santander, Bucaramanga.

- Gil, E., & Chamorro, A. (2009). *Técnicas Recomendadas para el Aumento de la Producción en Campos Maduros*. IHS Inc.
- Guevara Luna, M. A. (2015). *Diseño de un equipo de recuperación de líquidos de gas natural empleando CFD*. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia.
- Holmes, T., & Chen, G. (1984). Design and selection of spray/mist elimination equipment. . En *Chemical engineering* (págs. 82-89).
- Jaimes, R. G., & Herrera, J. D. (2012). Separadores Gas- Líquido Supersónicos. Simulación CFD, aplicación en la industria del Gas Natural en Colombia. *MET&FLU*, 34-42.
- Kidnay, A. J., & Parrish, W. R. (2006). *Fundamentals of Natural Gas Processing*. Taylor & Francis .
- KOCH-GLITSCH. (s.f.). *KOCH - GLITSCH*. Obtenido de <https://koch-glitsch.com/products/mist-elimination?productcategory=mist-elimination&categoryname=VORSOMAX-Mist-Eliminators>
- KOCH-GLITSCH. (s.f.). *KOCH-GLITSCH*. Obtenido de <https://koch-glitsch.com/products/mist-elimination?productcategory=mist-elimination&categoryname=DEMISTER-Mist-Eliminators>
- KOCH-GLITSCH. (s.f.). *KOCH-GLITSCH*. Obtenido de <https://koch-glitsch.com/products/mist-elimination?productcategory=mist-elimination&categoryname=DEMISTER-PLUS-Mist-Eliminators>
- Mokhatab, S., Poe, W. A., & Speight, J. G. (2006). *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing*. Elsevier Science & Technology.
- Morales, D. F. (s.f.). *Proceso de Separación de Petróleo y Gas*. Maturín, Monagas , Venezuela: Universidad de Oriente.

Munters. (s.f.). *Munters*. Obtenido de <https://www.munters.com/es/munters/products/mist-eliminators/kevin-mist-eliminator/>

Munters. (s.f.). *Munters*. Obtenido de <https://www.munters.com/en/munters/products/mist-eliminators/win---vane-type-mist-eliminators/>

Munters. (s.f.). *Munters*. Obtenido de <https://www.environmental-expert.com/products/munters-model-dpv-double-pocket-vane-type-separator-687944>

Pérez, M. C. (2005). *Estado del Arte de las tecnologías utilizadas para minimizar el arrastre de líquidos en separadores líquido-vapor en un proceso de acondicionamiento de gas*. Caracas: Universidad Metropolitana.

Poppele, E. W. (1958). CORRELATION OF MAXIMUM AIR VELOCITY WITH LIQUID ENTRAINMENT LOADING FOR WIRE MESH MIST ELIMINATORS. NEWARK, NEW JERSEY.

Prieto Jiménez, N., González Silva, G., & Chaves Guerrero, A. (2019). Revisión del proceso de separación de fases del gas natural a alta presión en la industria Oil&Gas. *Entramado*, 312-329.

Saeid, M., Poe, W. A., & Mak, J. Y. (2015). *Manual de Transmisión y Procesamiento de Gas Natural: Principios y Prácticas*. Gulf Professional Publishing.

Santos, N. (2015). *Diseño y Operación de plantas de Tratamiento de Gas*. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander.

SHELL GLOBAL SOLUTIONS INTERNATIONAL B.V. (Shell GSI). (December de 2007). MANUAL GAS/LIQUID SEPARATORS - TYPE SELECTION AND DESIGN RULES.

SULZER. (s.f.). *SULZER*. Obtenido de <https://www.sulzer.com/en/shared/products/shell-versiswirl>

SULZER. (s.f.). *SULZER*. Obtenido de <https://www.sulzer.com/en/shared/products/girz-cyclonic-inlet-device>

Swanborn, R. (1988). *A new approach to the design of gas/liquid separators for the oil industry*. Delft University of Technology.

Verlaan, C. (1991). *Performance of novel mist eliminators*. PhD thesis, Delft University of Technology.

zeta-pdm. (s.f.). *zeta-pdm*. Obtenido de <https://www.zeta-pdm.com/products/gas-liquid-demisting-devices/4g-fd-demisting-cyclone.html>

## Apéndices



**Apéndice A.** Torre de separación vista desde el este.



**Apéndice B.** Torre de separación vista desde el norte.



**Apéndice C.** Torre de separación vista desde el sur.