

Evaluación del Proceso de Separación Supersónica en la Remoción de Hidrocarburos
Pesados de Gas Natural Colombiano Usando Dinámica de Fluidos Computacional

Sergio Andrés Pérez Fuentes

Trabajo de Grado para Optar por el título de Magister en Ingeniería Química

Director

Arlex Chaves Guerrero
PhD. Ingeniería Química

Codirectores

Germán González Silva
PhD. Ingeniería Química

Fabián Andrey Díaz Mateus
PhD. Ingeniería Química

José Augusto Fuentes Osorio
M. Sc. Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander
Facultad De Ingenierías Fisicoquímicas
Escuela De Ingeniería Química
Bucaramanga

2020

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios, por permitirme ver y aprovechar las oportunidades que se me han presentado en la vida y dirigirme en el camino correcto para alcanzar mis metas. A mi familia, que me ha apoyado siempre en todo lo que he decidido hacer en mi vida. Al profesor Arlex, mi director, por su apoyo incondicional, su disposición y por guiarme con paciencia durante todo el desarrollo de este proyecto. A mis codirectores que de una u otra forma me hicieron grandes aportes y me ayudaron a comprender mejor cómo funciona el software utilizado para desarrollar las simulaciones realizadas en este trabajo.

Quiero agradecer también a Colciencias, por mi beca, por haber sido seleccionado y tener la oportunidad de realizar esta maestría. A mi universidad, porque en ella me formé también en mi etapa de pregrado. A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión y a la Facultad de Ingenierías Físicoquímicas por el apoyo recibido para presentar este proyecto en congresos internacionales. A la Escuela de Ingeniería Química, porque la siento como un segundo hogar y por todo el apoyo recibido.

Finalmente quiero agradecer todas las experiencias, anécdotas y momentos memorables que el desarrollo de este trabajo me permitió vivir.

Muchas Gracias.

Lista de Tablas

<i>Tabla 1. Comparación entre algunos de los diseños propuestos de separadores supersónicos..</i>	20
<i>Tabla 2. Modelos de turbulencia</i>	26
<i>Tabla 3. Modelos Multifase</i>	30
<i>Tabla 4. Parámetros de diseño del separador supersónico</i>	39
<i>Tabla 5. Valores de los parámetros de calidad de mallas usado en su construcción</i>	43
<i>Tabla 6. Malla base para realizar las simulaciones</i>	43
<i>Tabla 7. Resultados de la variación del ángulo de la sección divergente.....</i>	50
<i>Tabla 8. Medidas propuestas por Bian et al. (2018).....</i>	51
<i>Tabla 9. Condiciones de frontera para la simulación.....</i>	57
<i>Tabla 10. Composición molar del Gas Natural para validar la simulación.....</i>	58
<i>Tabla 11. Condiciones de operación y características de un Gas Natural.....</i>	58
<i>Tabla 12. Dimensiones características del separador de Wen et al. (2012).....</i>	61
<i>Tabla 13. Composición molar de un Gas Natural colombiano.....</i>	65
<i>Tabla 14. Condiciones de operación del Gas Natural.</i>	65
<i>Tabla 15. Propiedades del gas natural utilizado.....</i>	65
<i>Tabla 16. Porcentaje de recuperación de la presión.....</i>	68
<i>Tabla 17. Porcentaje de recuperación de líquidos de gas natural.....</i>	69
<i>Tabla 18. Porcentaje de condensación de cada uno de los componentes del gas natural.....</i>	69

Lista de Figuras

<i>Figura 1. Proceso convencional de tratamiento de gas natural</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2. Esquema ilustrativo del separador supersónico Twister.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 3. Comparación entre la recuperación CFD y la recuperación experimental.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 4. Comparación del perfil de presión experimental y el obtenido por CFD.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 5. Espectro de calidad para los parámetros de oblicuidad y calidad ortogonal</i>	<i>25</i>
<i>Figura 6. Cotas del separador supersónico – Cuerpo externo</i>	<i>40</i>
<i>Figura 7. Vista isométrica del separador supersónico destacando el cuerpo interno.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 8. Corte lateral del separador supersónico.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 10. Corte isométrico de la malla obtenida</i>	<i>44</i>
<i>Figura 9. Vista isométrica de la malla obtenida con las configuraciones de la tabla 6.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 11. Corte lateral de la malla obtenida con las configuraciones de la tabla 6</i>	<i>45</i>
<i>Figura 12. Boquilla propuesta por Bian et al. (2018).....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 13. Comparación del perfil de presión usando la geometría de Bian et al. (2018).....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 14. Comparación de ángulo de salida usando la geometría de Bian et al. (2018).....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 15. Comparación del perfil de temperatura usando la geometría de Bian et al. (2018) .</i>	<i>54</i>
<i>Figura 16. Comparación del perfil de velocidad usando la geometría de Bian et al. (2018).....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 17. Comparación del perfil de presión utilizando la geometría de Arina (2004).....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 18. Comparación del perfil de presión en el separador contra datos experimentales.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 19. Correlación entre el perfil de presión experimental y el obtenido a través de CFD .</i>	<i>60</i>
<i>Figura 20. Esquema del separador propuesto por Wen et al. (2012).....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 21. Comparación del perfil de presión utilizando la geometría de Wen et al. (2012).....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 22. Perfil de temperatura utilizando la geometría de Wen et al. (2012).....</i>	<i>63</i>

<i>Figura 23. Perfil de velocidad usando la geometría de Wen et al. (2012).....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 24. Líneas de flujo de la simulación</i>	<i>66</i>
<i>Figura 25. Perfil de presión para un gas natural colombiano.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 26. Perfil de temperatura de un gas natural colombiano.....</i>	<i>68</i>

Lista de Apéndices

Apéndice A. Propiedades del gas natural colombiano utilizado en la simulacion 77

Nomenclatura

CFD	Dinámica de Fluidos Computacional
CREG	Comisión de Regulación de Energía y Gas
DPM	Modelo de Fase Discreta
LGN	Líquidos de Gas Natural
RSM	Modelo de Esfuerzos de Reynolds
UPME	Unidad de Planeación Minero-Energética

RESUMEN

TÍTULO: Evaluación del Proceso de Separación Supersónica en la Remoción de Hidrocarburos Pesados de Gas Natural Colombiano Usando Dinámica de Fluidos Computacional. *

AUTOR: Sergio Andrés Pérez Fuentes. **

PALABRAS CLAVE: Simulación, gas natural, dinámica computacional de fluidos, campos de producción pequeños, remoción de hidrocarburos pesados, líquidos de gas natural.

DESCRIPCIÓN:

Típicamente, el proceso de separación de las fracciones de hidrocarburos pesados condensables del gas natural se realiza a través de separadores gravitacionales operados a bajas presiones. Sin embargo, este proceso tiene la desventaja de que es necesario recomprimir el gas tratado para inyectarlo a las líneas de transporte, lo que incrementa el costo de producción, y hace inviable económicamente los campos pequeños. Una solución a este problema es la tecnología de separación supersónica, en la cual hay una caída repentina de presión y temperatura que permite la separación de los líquidos de gas natural; luego, el gas natural pasa a través de un difusor donde se recupera parte de la presión de entrada. Por esta razón, el objetivo de esta investigación fue evaluar a través de CFD la viabilidad del proceso de separación supersónica en la remoción de los LGN aplicado a campos de producción colombianos.

El diseño geométrico se basó en información de patentes y artículos científicos, y, para aquellos parámetros que no pudieron tomarse de la literatura revisada, se realizaron simulaciones para establecer los mejores valores posibles para ellos. Se construyó una malla no estructura de elementos tetraedros y se realizaron pruebas de independencia para obtener la mejor relación posible entre la calidad y el número de elementos.

Adicionalmente, se realizaron simulaciones en ANSYS Fluent para comparar diferentes resultados contra otras investigaciones: una con aire usando el modelo de gas ideal para verificar la ubicación de la onda de choque, otra para verificar la caída de presión y temperatura y una final para comparar los resultados obtenidos en este trabajo con resultados experimentales. Finalmente, se realizó una simulación con gas natural colombiano para evaluar la recuperación de la presión de LGN. Los resultados obtenidos mostraron una recuperación de presión del 70,39% y una separación de LGN del 73,33%.

* Trabajo de investigación - Maestría en Ingeniería Química

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.

Director: Arlex Chaves Guerrero. PhD.

Codirectores: Germán González Silva. PhD. Fabián Díaz Mateus. PhD. José Fuentes Osorio. M. Sc.

ABSTRACT

TITLE: Evaluation of the supersonic separation process in the removal of heavy hydrocarbons in Colombian natural gas through computational fluid dynamics. *

AUTHOR: Sergio Andrés Pérez Fuentes. **

KEYWORDS: Simulation, natural gas, computational fluid dynamics, small production fields, Heavy hydrocarbons removal, natural gas liquids.

DESCRIPTION:

Typically, the process of separation of the condensable heavy hydrocarbon fractions of Natural Gas is done through gravitational separators operating at low pressures. However, this process has the disadvantage that it is necessary to re-compress the treated gas to introduce it to the transport lines, which increases the economic cost of production and make small production fields economically unviable. A solution to this problem is the supersonic separation technology, in which there is a sudden decrease in pressure and temperature that allows the separation of the NGL; then, the Natural Gas passes through a diffuser and part of the inlet pressure is recovered. For this reason, the objective of this research is to evaluate through CFD the viability of the supersonic separation process in the removal of NGL applied to Colombian production fields.

The geometric design was made based on available data from patents and scientific articles, and, for those parameters that could not be extracted from the reviewed literature, some simulations were done to establish the best possible value for them. An unstructured mesh with tetrahedral elements was design in ANSYS Meshing and a mesh independence test was carried out to get the best possible relationship between the quality of the mesh and the number of elements.

In addition, different simulations were carried out in ANSYS Fluent to compare results against other researches: one with air using the ideal gas model to verify the shockwave location, another one to verify the behavior of the pressure and temperature drop and a last one to compare experimental results against those obtained through CFD. Finally, a simulation was carried out with a Colombian Natural Gas to evaluate the pressure recovery and the separation of the NGL. The obtained results showed a pressure recovery of 70.39% and an NGL separation of 73.33%.

* Research Work – Master’s degree in Chemical Engineering

** Physical and Chemical Engineering’s Faculty. School of Chemical Engineering.

Director: Arlex Chaves Guerrero. PhD.

Codirectors: Germán González Silva. PhD. Fabián Díaz Mateus. PhD. José Fuentes Osorio. M. Sc.

Introducción

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos livianos que se produce de forma natural, compuesta principalmente por metano y en menor proporción por etano, propano y algunas trazas de hidrocarburos más pesados como butano, pentano y hexano. Además, puede contener impurezas como vapor de agua, dióxido de carbono, nitrógeno, sulfuro de hidrógeno y helio, entre otros (Demirel, 2012). La cantidad de cada uno de estos componentes varía dependiendo del pozo de producción (Russell et al., 2004).

Como fuente de energía, el gas natural provee el 23% de todo el consumo energético en el mundo con la ventaja de que su combustión, produce alrededor de un 30% menos dióxido de carbono que el petróleo y un 45% menos que el carbón para una misma cantidad de calor producido, por lo que es el combustible fósil con el menor impacto medioambiental. En Colombia, el gas natural es utilizado por el sector de generación eléctrica a través de turbinas de gas y de vapor y por otros sectores entre los que se encuentran las refinerías, la industria petroquímica, el consumo vehicular y el consumo residencial. El uso de gas natural como combustible vehicular ha crecido entre los años 1997 y 2014 un 1414% y en general, su demanda se ha incrementado en un 74% (Becerra Fernández & Rodríguez Yee, 2017).

Por otra parte, el Plan Indicativo de Abastecimiento de Gas Natural 2016 elaborado por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), se estima que para el año 2024 habrá un déficit del recurso entre los 97 y los 583 millones de pies cúbicos. Esto debido en parte a que los campos de la Guajira Chuchupa – Ballena, que junto con los campos Cusiana – Cupiagua producen entre el 70% y el 80% del gas natural del país, ya están empezando a bajar el ritmo de producción (Revista Dinero, 2016). Por esta razón, es necesario buscar alternativas de solución que permitan

mitigar el desabastecimiento a través de estrategias que optimicen el uso de los recursos disponibles.

Una de estas alternativas, consiste en aprovechar los pozos de producción de gas natural clasificados como «pequeños», y que actualmente son económicamente inviables debido a los altos costos incurridos durante su procesamiento para llevarlo a las condiciones de calidad mínimas para el transporte por gasoducto exigidas por las entidades regulatorias. Uno de estos procesos es la separación de hidrocarburos pesados del gas natural, que en la actualidad se realiza a través de la expansión y posterior recompresión hasta el valor que permita introducir el gas a las líneas de transporte. Por tal razón, esta propuesta se enfoca en la evaluación desde un punto de vista técnico, del proceso de separación de las fracciones pesadas del gas natural usando un dispositivo de separación supersónico, el cual permite eventualmente realizar la separación a una presión considerada como alta en relación con las actuales presiones de separación en dispositivos gravitacionales usados en la industria.

1. Marco Teórico y Estado del Arte

En Colombia, la CREG a través de la resolución 071 de 1999 (y complementada por la resolución 054 de 2007), establece las especificaciones de calidad que debe tener el gas natural (CREG, 2007) para poder ser transportado y vendido. De acuerdo con Guevara Luna (2015), una vez extraído el gas del pozo este tiene una presión cricondenbárica de aproximadamente 2500 psia lo que implica que a condiciones típicas de operación de transporte ($P < 2000$ psia), se puede presentar un flujo bifásico, que traería consigo problemas operativos como taponamientos por formación de hidratos, y erosión de las tuberías y baches de líquidos (hidrocarburos) que pueden generar daños a la infraestructura de transporte y distribución. Por esta razón, y para dar cumplimiento a las especificaciones de calidad, es necesario someter el gas natural a unos procesos de separación con el fin de evitar la condensación de algunos compuestos durante el transporte. Un proceso convencional de tratamiento de gas natural es ilustrado en la Figura 1. Estos procesos de separación inician con el endulzamiento del gas natural con el fin de remover el CO_2 y el H_2S presentes a partir de un proceso de absorción con una solución de amina con un alto contenido de agua. Posteriormente, el gas pasa por una etapa de deshidratación con el fin de disminuir su punto de rocío y evitar condensación durante el transporte a través de los gasoductos (Russell *et al.*, 2004). Una vez el gas esta endulzado y deshidratado, se realiza una expansión isoentálpica a través de una válvula de estrangulamiento (efecto Joule-Thomson), que genera una disminución de la presión y la temperatura permitiendo la condensación de los componentes pesados (Cuchimaque Lugo, 2006). Este proceso de enfriamiento también se puede llevar a cabo en un enfriador utilizando un refrigerante para disminuir la temperatura del gas y luego un separador bifásico para obtener los hidrocarburos pesados del gas natural (Guevara Luna, 2015).

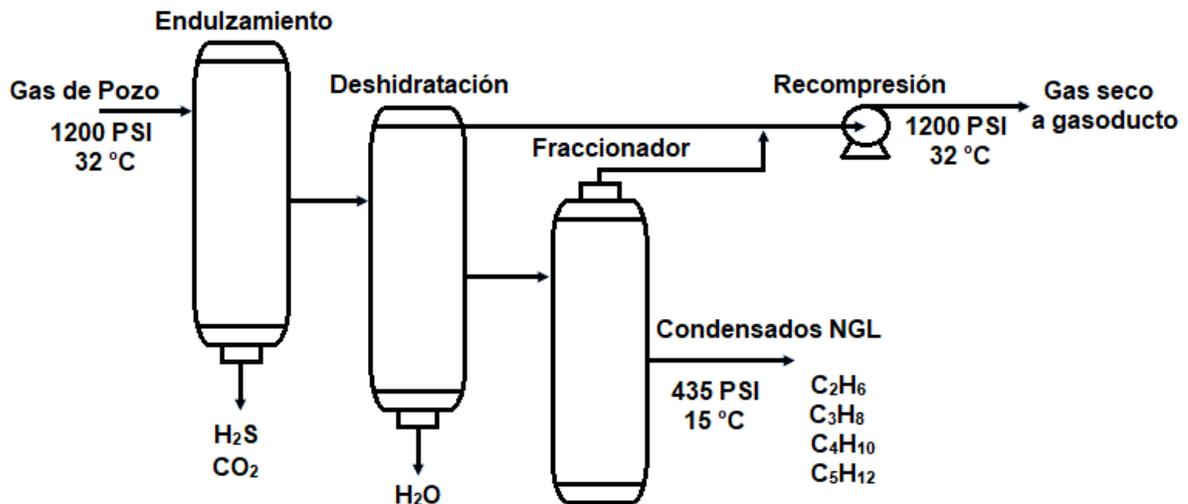


Figura 1. Proceso convencional de tratamiento de gas natural. Modificado de Energy Information Administration, Office of Oil and Gas, Natural Gas Division.

Para evitar la expansión y posterior recompresión, la compañía holandesa Twister BV desarrolló un separador supersónico que promueve la condensación y separación de los compuestos pesados del gas natural. La Figura 2 presenta un esquema del separador supersónico desarrollado por Twister BV. En este equipo, el gas es inducido a un flujo circular a través de álabes estáticos donde las fuerzas generadas son hasta de 500000g, para luego ser expandido a velocidades supersónicas donde la caída de temperatura y presión producen la condensación de los compuestos pesados del gas natural. Las gotas son expulsadas hacia las paredes del equipo y son retiradas a través de un separador ciclónico. Finalmente, el gas pasa a través de un difusor donde se recupera del 80 - 85% de la presión original si la presión de entrada es suficientemente alta (Gamboa & Badillo, 2012). Debido a que el tiempo de residencia dentro del separador es del orden de milisegundos, es posible realizar la deshidratación del gas junto con la condensación de los compuestos pesados sin la formación de hidratos dentro del mismo (Twister BV, 2017).

Para la operación del separador supersónico, es necesario que el gas entre con una alta presión, lo que podría suponer una desventaja dado se requeriría una compresión previa a la etapa de separación. Sin embargo, las operaciones de endulzamiento y deshidratación se realizan a presiones del orden de los 1200 psia con el fin de disminuir los costos de operación (Guevara Luna, 2015), presión que sería suficiente para el uso eficiente del separador supersónico según reporta Machado (2012). Otro punto a favor de esta tecnología es la disminución en el número de equipos utilizados en el proceso de separación que supone una reducción considerable de los costos de operación, lo que hace a la tecnología una alternativa bastante interesante.

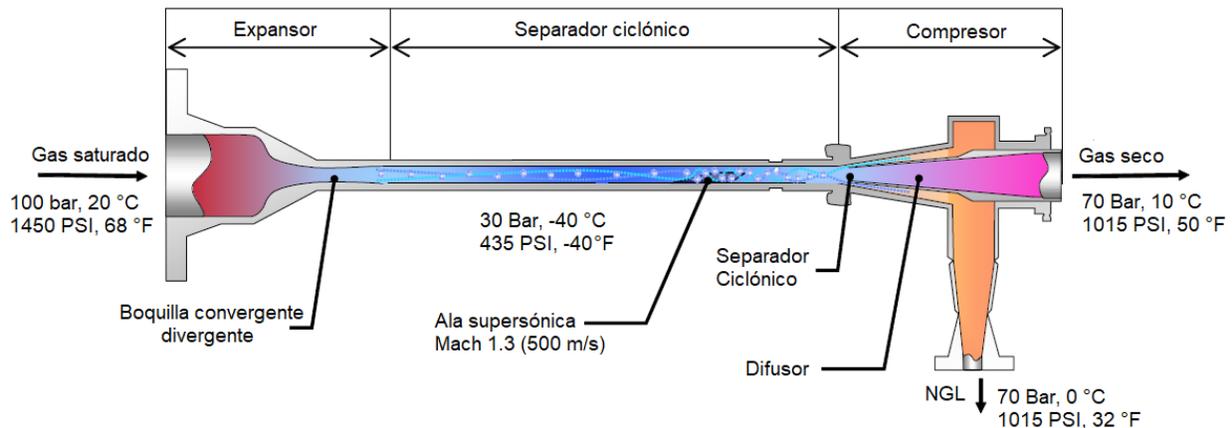


Figura 2. Esquema ilustrativo del separador supersónico Twister. Modificado de (Okimoto & Brouwer, 2002)

Sin embargo, el diseño del separador supersónico presentado por la compañía Twister B.V. no es el único que ha sido propuesto y existen otros diseños que también buscan hacer más eficiente el proceso y mejorar las condiciones de operación. La Tabla 1 presenta un resumen de algunos diseños propuestos.

Tabla 1.

Comparación entre algunos de los diseños propuestos de separadores supersónicos.

Diseño	Características principales	Limitaciones
TWISTER B.V. (Okimoto & Brouwer, 2002)	<ul style="list-style-type: none"> • Hoja deflectora para generar el remolino. • Cuerpo central para incrementar el rendimiento de la separación. • Caída de temperatura hasta -40°C. 	<ul style="list-style-type: none"> • Inhabilidad para manejar flujos másicos variables y pérdidas de presión de hasta el 30%
3S Separador supersónico (Alfyorov et al., 2005)	<ul style="list-style-type: none"> • Híbrido entre dos separadores TWISTER. • Generador de remolino incluido. • Paletas dirigidas para flujo lineal a la salida. • Caída de temperatura hasta -70°C. 	<ul style="list-style-type: none"> • Geometría fija que no permite modificar la cantidad de flujo másico.
Garret Design (Garrett, 1971)	<ul style="list-style-type: none"> • Destaca un mezclador plano y un área mínima de garganta interviniendo entre las zonas convergente y divergente • Pared permeable para recoger el fluido condensado. • Región de flujo ajustable. • Campo electrostático para mejorar la separación. 	<ul style="list-style-type: none"> • El rendimiento de la separación depende del radio de curvatura del ducto, el cual es afectado por la presencia de ondas de choque no deseadas.
Keisuke Design (Keisuke, 1990)	<ul style="list-style-type: none"> • Una boquilla convergente-divergente con un mezclador de remolino interno y dos bombas de vacío conectadas a las salidas. 	<ul style="list-style-type: none"> • El diseño se destaca por la alta caída de presión debido a la gran distancia axial. • Se requiere mucha energía para sostener un flujo de remolino fuerte a través de la zona de separación.

Van Holten

(Van Holten, 1992)

- Una forma cilíndrica que converge a una boquilla y diverge a una boquilla de remolino.
- Elementos en forma de placas adjuntadas a las paredes internas y salientes radiales que hacen que flujo sea en forma de remolino.
- El gas a velocidades supersónicas es descargado a través de una línea central.
- Un ventilador de succión es instalado en la sección divergente para sacar el fluido.
- El diseño sufre de erosión en las placas deltoides.
- Requiere gran energía para el ventilador.
- No hay forma de procesar un flujo másico variable.
- Tiene baja eficiencia debido a la presencia de ondas de choque en la primera y segunda salida.

SUSTOR-I&II

(Borissov et al., 2014)

- El SUSTOR-I implica un cuerpo central de entrada múltiple donde el flujo en remolino es inducido usando paletas guía.
- La caída de temperatura es de hasta -73°C .
- La reducción de la caída de presión es equivalente a la reducción de temperatura.
- El líquido es removido a través de rendijas.
- El gas seco sale a través de una salida tangencial.
- La salida tangencial en el SUSTOR-II fue pensada para mitigar la caída de presión en el SUSTOR-I.
- Puede ser escalado para cualquier tasa de flujo de gas.
- La geometría del molde es relativamente compleja.

<p>Wen et al. (Patent N.º CN102167988B, 2013)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Una carcasa cilíndrica que comienza desde la brida de entrada hasta la tubería en expansión. • Un cuerpo central y unas hojas generadoras de flujo en remolino. • Estructura simple. 	<ul style="list-style-type: none"> • Es difícil verificar que corre establemente y que tiene una alta eficiencia y hay información limitada de su rendimiento y su rango de trabajo. • Geometría fija que hace imposible manejar ratas de flujo másico variable.
<p>Beijing University of Technology (Liu et al., 2005)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • No posee cuerpo central • El generador de flujo en remolino está localizado después de la boquilla. • Contiene un total de 7 termopares a lo largo de la boquilla. • Flujo tangencial a través de dos entradas simétricas que pueden ajustarse para incrementar o disminuir la velocidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cambiar el tamaño de las entradas no tuvo efecto en la rata de flujo. • Los gradientes en la velocidad tangencial cerca al eje de la boquilla debido a la falta de un eje central.

Nota 1. Modificado de (Altam et al., 2017)

De esta manera, varios investigadores han realizado estudios de diseño, eficiencia y viabilidad económica del proceso de separación de deshidratación y remoción de condensados del gas natural a través del uso de separadores supersónicos, entre ellos, Prast, Lammers y Betting (2006), quienes realizaron un modelo del separador supersónico Twister empleando dinámica computacional de fluidos y validaron sus resultados comparando con datos experimentales del perfil de presión y de la recuperación de los componentes. La Figura 3 muestra una comparación entre la recuperación experimental de los compuestos de acuerdo con su peso molecular y la recuperación obtenida mediante el modelo realizado en CFD.

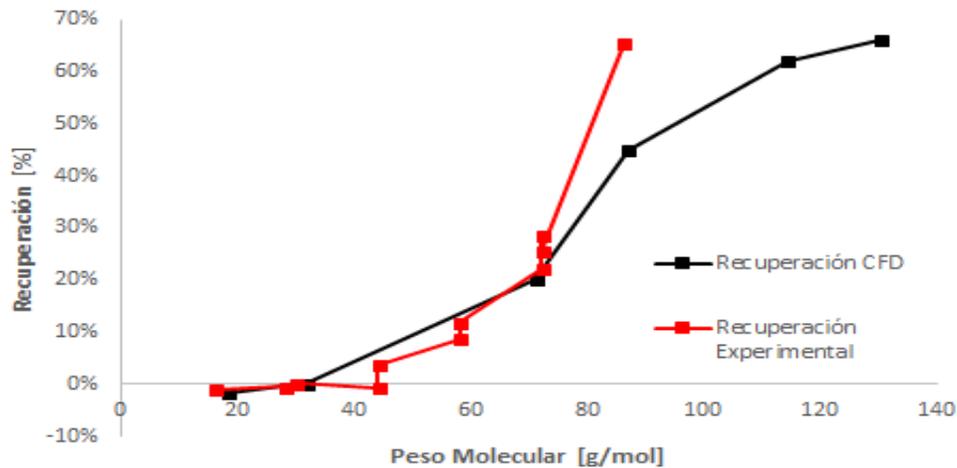


Figura 3. Comparación entre la recuperación obtenida en CFD y la recuperación experimental. Modificado de (Prast et al., 2006)

La Figura 4 muestra la comparación entre el perfil de presión obtenido de la simulación y el perfil de presión obtenido con puntos experimentales. Como se puede observar en estas figuras, aunque los porcentajes de recuperación y las presiones difieren en la mayoría de los puntos, la tendencia es la misma, y de acuerdo con los autores esto significa que aún deben desarrollarse nuevos modelos para tener un mejor entendimiento del proceso y así obtener mejores resultados en el modelamiento CFD.

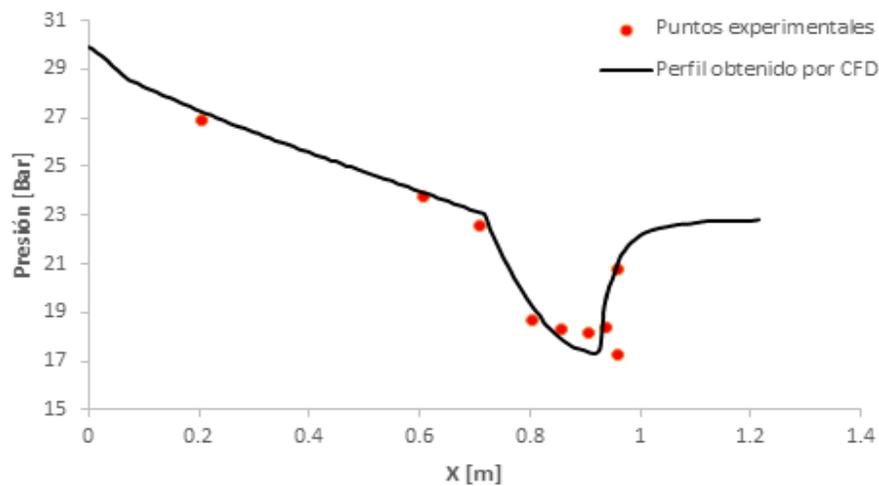


Figura 4. Comparación del perfil de presión experimental y el obtenido por CFD. Tomado de (Prast et al., 2006)

En 2015, Guevara Luna llevó a cabo un estudio donde encontró una geometría alternativa para el diseño de un separador supersónico con el fin de mejorar la recuperación de compuestos condensables del gas natural y validó su diseño contrastando con los resultados experimentales obtenidos por Prast, Betting y Lammers (2006) logrando un porcentaje de recuperación superior. Sin embargo, aún existen muchos vacíos en diferentes áreas que suponen entonces limitaciones en la aplicación de esta tecnología.

1.1. Dinámica Computacional de Fluidos (CFD)

La Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) es una herramienta que permite analizar y dar solución a las ecuaciones que gobiernan los principios de conservación de la masa, la energía y el momento de un fluido a través de la división de un dominio de flujo en pequeños volúmenes discretos en los cuales se calculan las propiedades del fluido y se da solución a las ecuaciones fundamentales de conservación.

El modelamiento de un proceso a través de la Dinámica Computacional de Fluidos se realiza a través de una metodología que comprende tres etapas: el pre-procesamiento, el procesamiento y el

post procesamiento. En el pre-procesamiento se lleva a cabo la definición de la geometría, la generación de malla en la que se divide el dominio de flujo en volúmenes discretos, la selección de los fenómenos que se quieren modelar, la definición de las propiedades de los fluidos que se va a analizar y las condiciones de frontera. El procesamiento se basa en el uso de un software que a través de una técnica numérica permita discretizar y dar solución a las ecuaciones que gobiernan el flujo del fluido a través de un método iterativo. Finalmente, el post procesamiento consiste en el análisis, organización y presentación de los resultados obtenidos (Versteeg & Malalasekera, 2007).



Figura 5. Espectro de calidad para los parámetros de oblicuidad y calidad ortogonal. (Ardila Marín et al., 2016)

Por otra parte, dentro del modelamiento en CFD es importante tener en cuenta la calidad de la malla realizada debido a que tiene una influencia fundamental en la confiabilidad de los resultados obtenidos y en el tiempo total de cómputo del proceso. La evaluación de la calidad de la malla puede realizarse teniendo en cuenta el criterio de ortogonalidad u oblicuidad de esta. De acuerdo con Ardila Marín (2016), para obtener una malla de calidad se recomienda mantener la calidad ortogonal del peor elemento por encima de 0,1 y la oblicuidad por debajo de 0,95. La Figura 5 muestra, en términos generales, un espectro de calidad para las métricas.

1.2. Modelamiento Matemático

Para describir matemáticamente los fenómenos físicos que tienen lugar en el proceso de separación supersónica es necesario utilizar modelos que se ajusten a las condiciones del flujo y permitan predecir correctamente el comportamiento hidrodinámico, el comportamiento termodinámico y las fases dentro del separador. De acuerdo con Yeoh & Tu (2010) para describir el comportamiento hidrodinámico es necesario utilizar un modelo de turbulencia apropiado que considere correctamente este fenómeno.

1.2.1. Modelo de turbulencia. Los modelos matemáticos computacionales que describen la turbulencia se pueden clasificar en «*Reynolds Average Navier Stokes*» (RANS) que son modelos que se basan en promediar las ecuaciones del fluido y dentro de los cuales existen modelos de cero, una, dos y múltiples ecuaciones, los modelos «*Large Eddy Simulations*» (LES) que se basan en un filtrado espacial de las ecuaciones del fluido de manera que se resuelven las grandes escalas y para las pequeñas se asume un modelo que considere su influencia en los parámetros de flujo (Capote et al., 2008) y el modelo «*Direct Numeric Simulation*» (DNS) en el cual no se promedian ni se aproximan las ecuaciones de Navier-Stokes sino que se intentan resolver de forma directa, por lo que es el modelo que ofrece los resultados más exactos; sin embargo, en términos de costo computacional este modelo es el más costoso y requiere equipos muy potentes o de un clúster. Algunos modelos de turbulencia son mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2.
Modelos de turbulencia.

RANS	LES/DES
SPALART – ALLMARAS	DDES
STANDARD $\kappa - \epsilon$	IDDES
RNG $\kappa - \epsilon$	SMAGORINSKY – LILLY MODEL
REALIZABLE $\kappa - \epsilon$	WALL ADAPTING LOCAL EDDY VISCOSITY (WALE)

STANDARD $\kappa - \omega$	DYNAMIC SMAGORINSKY – LILLY MODEL
SST $\kappa - \omega$	DYNAMIC KINETIC ENERGY TRANSPORT
4 – EQUATION V2F*	WALL – MODELED LES (WMLES)
RSM (REYNOLDS STRESS MODEL)	SAS (SCALE ADAPTIVE SIMULATION SST)
$\kappa - \kappa l - \omega$ TRANSITION MODEL	
SST TRANSITION MODEL	

Nota 1-1. Tomado de (ANSYS Inc., 2009).

De acuerdo con la literatura consultada el modelo «*Reynolds Stress Model*» RSM es el más adecuado para este tipo de flujo turbulento en forma de remolino a alta velocidad que se maneja debido a que puede calcular con gran precisión los efectos anisotrópicos (Prast et al., 2006; Wang & Hu, 2018; Yeoh & Tu, 2010); sin embargo, el modelo RNG $\kappa - \varepsilon$ modificado para flujo giratorio también es ampliamente recomendado (Wen, Cao, & Yang, 2011; Zhang et al., 2014) porque incluye un parámetro («*Swirl Factor*») que permite modificar la viscosidad turbulenta teniendo en cuenta el flujo en remolino, con la ventaja de que requiere menor capacidad de cómputo que el modelo de esfuerzos de Reynolds (RSM). Con base en estas características y teniendo en cuenta la potencia computacional a disposición, este trabajo fue desarrollado con el modelo RNG $\kappa - \varepsilon$ modificado para flujo giratorio. Las ecuaciones (1) y (2) describen el modelo RNG $\kappa - \varepsilon$ modificado para flujo giratorio.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\kappa) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\kappa u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\kappa \mu_{eff} \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right) + G_\kappa + G_b - \rho\kappa - Y_M + S_\kappa \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} (G_\kappa + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (2)$$

Donde G_κ representa la generación de energía cinética de turbulencia, descrita por:

$$G_{\kappa} = -\overline{\rho u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (3)$$

G_b Es la generación de energía cinética turbulenta debido a la flotación, calculada como:

$$G_b = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (4)$$

Y_M Corresponde a los efectos de un flujo compresible en la turbulencia, descritos por:

$$Y_M = 2\rho\varepsilon M_t^2 \quad (5)$$

Y M_t corresponde al número de Mach turbulento definido como:

$$M_t = \sqrt{\frac{\kappa}{\gamma RT}} \quad (6)$$

Las cantidades α_{κ} y α_{ε} corresponden a los números de Prandtl inversos (inverse effective Prandtl numbers) para κ y ε , respectivamente. Los términos $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ y $C_{3\varepsilon}$ son constantes y S_{κ} y S_{ε} son términos fuente definidos por el usuario.

La modificación realizada al modelo RNG $\kappa - \varepsilon$ en el software ANSYS Fluent para tener en cuenta los efectos que produce el flujo giratorio consiste en modificar la viscosidad turbulenta de manera apropiada. La modificación realizada es:

$$\mu_t = \mu_{t_0} f \left(\alpha_s, \Omega, \frac{\kappa}{\varepsilon} \right) \quad (7)$$

Donde μ_{t_0} es el valor de la viscosidad turbulenta calculada como:

$$\mu_{t_0} = 0.0845\rho \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

Ω Es un número característico de giro (evaluado dentro del software) y α_s es un factor de giro constante que puede tomar diferentes valores dependiendo de qué tan dominante sea el giro.

1.2.2. Modelo termodinámico. El comportamiento termodinámico del fluido a las condiciones de operación del flujo supersónico puede ser modelado utilizando una ecuación de estado que sea lo suficientemente precisa (Russell et al., 2004). De acuerdo con Wen (2012) la ecuación de Peng – Robinson (9) tiene un mejor rendimiento cerca de las condiciones críticas y por lo tanto sería una buena elección para modelar el comportamiento termodinámico.

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a(T)}{V(V + b) + b(V - b)}$$

$$b = 0,077796 \frac{RT_c}{P_c}$$

$$a(T) = \left(0,45724 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \right) * \alpha(T) \quad (9)$$

$$\alpha(T) = \left[1 + k \left(1 - \sqrt{\frac{T}{T_c}} \right) \right]^2$$

$$k = 0,37464 + 1,54226\omega - 0,26992\omega^2$$

1.2.3. Modelo multifásico. Para el modelamiento de las fases dentro del separador se han propuesto varias aproximaciones (Bao et al., 2010; Wen et al., 2012) y existen diferentes modelos que se pueden aplicar en la dinámica computacional de fluidos como los que se muestran en la Tabla 3. Sin embargo, se recomienda el uso del modelo «*Discrete Phase Model*» (DPM) porque la fracción de volumen correspondiente a los compuestos condensables es menor del 10%. Además, debido a que el proceso se realiza a velocidad supersónica y a que la fracción de volumen de los compuestos condensables es pequeña, se pueden despreciar efectos térmicos y volumétricos por el cambio de fase, así como algunos efectos viscosos (Guevara Luna, 2015).

Tabla 3.
Modelos Multifase.

VOLUME OF FLUID MODEL
MIXTURE MODEL
EULERIAN MODEL
DISCRETE PHASE MODEL (DPM)
WET STEAM MODEL

Nota 1-2. Tomado de (ANSYS Inc., 2009).

El modelo de fase discreta (DPM) consiste en la interacción de una fase continua (Euleriana) y una fase discreta (Lagrangiana). Para la fase continua de este modelo, la ecuación de continuidad (10) puede escribirse como:

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = S_{DPM} + S_{Cont} \quad (10)$$

Donde S_{DPM} es el término fuente de partículas y S_{Cont} es el término fuente de la fase continua.

La ecuación de movimiento (11) puede escribirse como:

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \vec{g} + \vec{F}_{DPM} + \vec{F}_{Cont} \quad (11)$$

Donde \vec{F}_{DPM} y \vec{F}_{Cont} son las fuerzas debidas a las interacciones con las partículas que conforman la fase discreta y las fuerzas externas que interactúan con la fase continua respectivamente.

Las ecuaciones (12) y (13) son una extensión de las ecuaciones de conservación de masa (10) y conservación de momento (11) que permiten tener en cuenta la fracción de volumen (α) para una fase i :

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \vec{u}_i) = \sum_{q=1}^{n \text{ fases}} (\dot{m}_{qi} - \dot{m}_{iq}) \quad (12)$$

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i \bar{u}_i)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\alpha_i \rho_i \bar{u}_i \bar{u}_i) = -\alpha_i \vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot [\alpha_i \mu_i (\vec{\nabla} u_i - \vec{\nabla} u_i^T)] + \alpha_i \rho_i \vec{g}$$

$$F_{drag, cut, user} + \sum_{q=1}^{n \text{ fases}} (\vec{K}_{qi} (\bar{u}_q - \bar{u}_i) + \dot{m}_{qi} \bar{u}_{qi} - \dot{m}_{iq} \bar{u}_{iq}) + K_{DPM} (\bar{u}_{DPM} - \bar{u}_i) \quad (13)$$

$$+ S_{DPM, Explícita}$$

Donde los términos de intercambio denotados como DPM (partículas de la fase discreta) son considerados únicamente en la fase primaria. Como resultado, se obtienen una ecuación de continuidad y una ecuación de movimiento por fase además de los modelos de la física de interacción de las fases como arrastre o corte. (ANSYS Inc., 2013)

2. Planteamiento del problema

Los métodos convencionales de separación de hidrocarburos pesados del gas natural (gravitacionales o ciclónicos), hacen inviables económicamente los campos de producción pequeños debido a que sus condiciones de operación implican bajas presiones para que la separación de los condensados sea eficiente. Esto hace necesario un posterior proceso de recompresión que conlleva altos costos de operación. Por otra parte, el proceso convencional también involucra un mayor número de equipos que repercute finalmente en los costos de operación.

3. Hipótesis

Es viable técnicamente la implementación de un separador supersónico para la separación de condensados de hidrocarburos pesados en pozos de gas natural colombianos de baja producción.

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

Evaluar a través del uso de la dinámica computacional de fluidos (CFD) la viabilidad del proceso de separación supersónica para la deshidratación y remoción de los compuestos pesados del gas natural, a condiciones de presión, temperatura y flujo de gas en pozos de gas aprovechados y no aprovechados en Colombia.

4.2. Objetivos Específicos

- Realizar una revisión de los modelos de fenómenos de transporte utilizados en la simulación de separadores supersónicos.
- Definir las variables termodinámicas, físicas y químicas representativas en la separación supersónica de flujo compresible, así como las condiciones de iniciales y de frontera para el proceso.
- Determinar la eficiencia del separador supersónico en el proceso de separación de condensados del gas natural a condiciones de un campo de producción colombiano.
- Comparar la simulación de separación supersónica de un campo colombiano con datos de la literatura o de campo.

5. Alcance

El alcance previsto para esta investigación aborda la implementación de un modelo fenomenológico para determinar la eficiencia de separación supersónica usando dinámica de fluidos computacional (CFD), comparando con investigaciones publicadas en la literatura y aplicado a algunos campos pequeños de producción de gas natural en Colombia.

6. Metodología

6.1. Realizar un estado del arte de la implementación de la tecnología de separación supersónica con el fin de obtener suficiente documentación para el desarrollo de la simulación.

Existen diferentes enfoques en el uso de la tecnología de separación supersónica, por lo que un estado del arte robusto permitirá tomar la mejor decisión sobre los modelos matemáticos a utilizar y las diferentes especificaciones y consideraciones geométricas necesarias para llevar a cabo la simulación y obtener resultados más confiables. Además, se realizará una recolección de algunos datos de condiciones iniciales de operación y composición del gas natural en campos pequeños.

6.2. Seleccionar los modelos matemáticos a utilizar y definir las herramientas computacionales en las cuales se realizarán la simulación y el diseño del separador supersónico.

La simulación del separador supersónico se llevará a cabo en el software ANSYS FLUENT ya que de acuerdo con la bibliografía consultada (Haghighi, Hawboldt, & Abdi, 2015) muchos

investigadores han trabajado sus simulaciones en este software les ha permitido obtener resultados que son comparables a datos experimentales; sin embargo, es posible que se requiera de otras herramientas computacionales para el cálculo de las propiedades termodinámicas del gas natural debido a que este software no es muy fuerte en ese sentido. Del mismo modo, también será importante definir el modelo matemático adecuado a utilizar para la parte hidráulica analizando todas las ventajas y desventajas en términos de costo computacional y tiempo de simulación.

6.3. Diseño del separador supersónico utilizando un software de diseño computacional asistido (CAD).

Para poder llevar a cabo la simulación es necesario diseñar la geometría del separador y definir los parámetros del modelo. Este proceso se realizará en el software ANSYS DESIGN MODELER ya que posee una interfaz intuitiva y sencilla de usar, además de que cuenta con herramientas útiles que facilitaran el desarrollo de la geometría y el establecimiento del dominio de flujo. El diseño de geométrico se hará teniendo en cuenta la bibliografía consultada y las diferentes patentes públicas con diseños de separadores supersónicos que contienen información de los parámetros de diseño (B. Prast et al., 2006; Yang et al., 2014).

6.4. Desarrollo y evaluación de las mallas para el separador supersónico teniendo en cuenta la geometría establecida.

La elaboración de las mallas se realizará con el software ANSYS MESHING. Esta es una de las etapas que más tiempo requiere antes de la simulación del separador, por lo que se debe hacer muy cuidadosamente ya que un buen mallado puede repercutir positivamente en la reducción de los tiempos de simulación. Se realizará un test de malla para determinar el número mínimo de volúmenes finitos con los que es posible obtener resultados confiables teniendo en cuenta siempre

el tiempo de cómputo necesario para llevar a cabo la simulación. También será importante tener en cuenta otros aspectos de la malla como el refinamiento de esta en regiones donde el dominio de flujo tenga una mayor cantidad de detalles.

6.5. Realizar la simulación del flujo supersónico en el separador diseñado.

En este paso de la metodología se aplica todo lo realizado anteriormente y se pone a prueba la calidad de la geometría diseñada y el mallado realizado. De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada se hará una simulación completa del equipo en la que se usará el *solver* «*Density-Based*» por las condiciones de operación (Números de Mach de 0,7 a 1,4). Teniendo en cuenta las recomendaciones de ANSYS, este es el tipo de *solver* que se debe utilizar ya que está diseñado para flujos compresibles y de alta velocidad, resolviendo de manera conjunta las tres ecuaciones de momento, energía y continuidad en cada iteración. Además, en este paso se especifican todos los parámetros y configuraciones de los modelos que se van a utilizar para simular los fenómenos que se quieren describir. Una vez se han puesto todos los datos requeridos y se han hecho todas las configuraciones requeridas, se procede con la simulación del proceso de separación supersónica.

6.6. Comparar los datos obtenidos en la simulación con datos experimentales reales y con otras investigaciones con el fin de corroborar y dar validez a la información conseguida.

Con el fin de comparar la simulación se verificarán datos de otras investigaciones de la literatura (Bian et al., 2018; Guevara Luna, 2015; Wen et al., 2012) así como también se contrastará con datos reales de artículos científicos (B. Prast et al., 2006) consultados en el estado del arte.

6.7. Aplicar el modelo a la simulación de procesos de separación de gas natural con propiedades fisicoquímicas y parámetros de operación de campos de producción de gas natural pequeños.

Una vez validada la simulación, se utilizarán los datos recolectados de los campos colombianos con el fin de realizar predicciones en campos de producción de gas natural pequeños a través del uso del separador supersónico diseñado en este trabajo.

7. Resultados

Durante el desarrollo del proyecto se realizaron diferentes simulaciones con el fin de ajustar los parámetros geométricos que no fueron tomados de la literatura, asimismo se realizaron varias simulaciones para comparar contra resultados obtenidos en otras investigaciones, tanto resultados de simulaciones como experimentales. Finalmente se simuló el proceso de separación supersónica para un gas natural colombiano a condiciones presión y temperatura similares a las que se utilizan en el proceso de tratamiento convencional a través de separadores gravitacionales. Todos los resultados obtenidos en estas simulaciones se presentan a continuación.

7.1. Desarrollo de la simulación

En el desarrollo de este estudio se utilizaron dos equipos de cómputo: uno con 16 Gb de memoria RAM y un procesador Intel® Core™ i7-6700 a 3.4 GHz y otro con 32 Gb de memoria RAM y un procesador Intel® Core™ i7-8750h a 2.20GHz. En ellos se realizaron simulaciones paralelas de configuraciones diferentes con el fin de agilizar la obtención de resultados. Los tiempos de simulación variaron dependiendo de la simulación realizada, tardando para las comparaciones con

Arina (2004) alrededor de treinta minutos; para las comparaciones con Bian et al. (2018), aproximadamente una hora y media; en las simulaciones para comparar contra Wen et al. (2012) cerca de cuatro horas y finalmente en la simulación de un gas natural de un campo colombiano tomaba alrededor de un día. El modelado del separador supersónico se realizó en gran parte a través de las herramientas disponibles en el software de ANSYS (Design Modeler, Meshing, Fluent, Post), dado que de acuerdo con la bibliografía consultada (Haghighi, Hawboldt, & Abedinzadegan Abdi, 2015), muchos investigadores que los han usado, obtuvieron resultados que son comparables a datos experimentales. La construcción geométrica básica del separador fue realizada en el software Solid Works e importada directamente al software de ANSYS para llevar a cabo este estudio. Del mismo modo, para el cálculo de las propiedades termodinámicas del gas natural se utilizó la herramienta computacional PRO II Process Engineering y los datos obtenidos se introdujeron en el software ANSYS Fluent. Finalmente, el desarrollo de la simulación se dividió en cuatro grandes etapas: La construcción de la geometría, la elaboración de la malla, la configuración y puesta en marcha de la simulación y finalmente, el análisis de los resultados obtenidos.

7.2. Construcción de la Geometría del Separador Supersónico:

Dado que existen diferentes enfoques en el uso de la tecnología de separación supersónica, el diseño geométrico se hizo teniendo en cuenta la bibliografía consultada y las diferentes patentes públicas con diseños de separadores supersónicos que contienen información de los parámetros necesarios para la construcción de la geometría del equipo (Prast *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 2014). Sin embargo, no todos los detalles geométricos son reportados en la literatura, por lo que fue necesario proponer algunas medidas con base en los datos conocidos para finalizar el diseño. La construcción fue hecha en el software Solid Works; el diseño consta de un cuerpo externo, un

cuerpo interno y un área de flujo constituida por el espacio anular entre estos dos. Para la construcción de la curvatura de la sección convergente del separador existen tres tipos de líneas típicas descritas por las ecuaciones (14), (15) y (16). Estas curvas son: La curva de Witozinsky, la curva bi-cúbica paramétrica y la curva polinómica de quinto grado, respectivamente.

$$r = \frac{r_{cr}}{\sqrt{1 - \left[1 - \left(\frac{r_{cr}}{r_1}\right)^2\right] \frac{\left[1 - \left(\frac{x}{L}\right)^2\right]^2}{\left[1 + \frac{1}{3}\left(\frac{x}{L}\right)^2\right]^3}}} \quad (14)$$

$$\frac{r - r_{cr}}{r_1 - r_{cr}} = 1 - \left(\frac{1}{x_m^2}\right) \left(\frac{x}{L}\right)^3 \quad \left(\frac{x}{L} \leq x_m\right) \quad (15)$$

$$\frac{r - r_{cr}}{r_1 - r_{cr}} = \left(\frac{1}{(1 - x_m)^2}\right) \left(1 - \frac{x}{L}\right)^3 \quad \left(\frac{x}{L} \geq x_m\right)$$

$$\frac{r - r_{cr}}{r_1 - r_{cr}} = 1 - 10 \left(\frac{x}{L}\right)^3 + 15 \left(\frac{x}{L}\right)^4 - 6 \left(\frac{x}{L}\right)^5 \quad (16)$$

En estas ecuaciones, r_{cr} corresponde al radio en la garganta del equipo, r_1 representa el radio al inicio de la sección convergente, L es la longitud de la sección y r es el radio del equipo en la posición x . Para la curva bicúbica paramétrica, x_m representa un parámetro definido por la relación entre la posición y la longitud.

En la construcción de este separador se usó como base la curva de Witozinsky porque permite un campo de flujo más estable y un vórtice pequeño (Hou *et al.*, 2018). Una vez el diseño estuvo terminado fue importado directamente al software ANSYS Design Modeler, en donde se realizaron simplificaciones de forma (algunas esquinas redondeadas se hicieron rectas) con el fin facilitar la

construcción de la malla y reducir el tiempo de cómputo. Además, a medida que se fueron realizando simulaciones del proceso de separación supersónica se fueron realizando algunas modificaciones y ajustando las dimensiones de las que no se tenía una referencia previa con el fin de obtener resultados más acertados. La Tabla 4 muestra algunos parámetros de diseño relevantes.

Tabla 4.
Parámetros de diseño del separador supersónico.

Variable Geométrica	Medida	Referencia
Diámetro de entrada	54,79 mm	Estimado a partir de relaciones sobre diagramas de Guevara Luna (2015).
Longitud de la entrada (Hasta el fin de los álabes)	259 mm	Estimado a partir de relaciones geométricas establecidas en (Betting et al., 2008)
Diámetro externo (inicio de la sección convergente)	91 mm	Estimado a partir de relaciones sobre diagramas de Guevara Luna (2015).
Diámetro interno (inicio de la sección convergente)	73,54 mm	Estimado a partir de la relación propuesta por Guevara Luna (2015).
Diámetro Externo en la garganta	32,80 mm	Valor Establecido por la posición de la garganta a través de la curva de Witoszynski (Hou et al., 2018)
Diámetro interno en la garganta	22,76 mm	Valor Establecido por la posición de la garganta a través de la curva de Witoszynski (Hou et al., 2018)
Longitud convergente	660 mm	(Guevara Luna, 2015)
Longitud de la sección divergente	87,67 mm	Estimada a partir de la distancia entre la garganta y el recolector.
Ángulo de elevación de la sección divergente	1, 25°	Estimado a partir de comparaciones con la literatura (Bian et al., 2018).
Ubicación de la garganta	919 mm	(Guevara Luna, 2015)
Ángulo del recolector	22°	(Guevara Luna, 2015)
Longitud del difusor	221 mm	Estimada a partir de la longitud total del separador.
Diámetro de salida gas seco	91 mm	Establecido por el diámetro externo al inicio de la sección convergente.
Diámetro de salida de LGN	30,30 mm	(Guevara Luna, 2015)
Longitud total del separador	1400 mm	(Prast et al., 2006)

Basado en las medidas presentadas en la Tabla 4 se construyó en el software SolidWorks (por facilidades de diseño y en el uso de las herramientas de construcción) la geometría del separador supersónico presentado en las Figura 6, 7 y 8. En las Figura 6-a y 6-b se muestran dos esquemas de cotas del separador en donde se pueden ver representados todos los datos de la Tabla 4. Una vez terminado, este diseño se importó al software Design Modeler de ANSYS en el cual se realizaron algunos ajustes con el fin de preparar la geometría para el mallado. En la Figura 7, presentada a continuación, se muestra una vista isométrica en la que destacan el cuerpo interno del separador (en verde) y la cara interna del cuerpo externo (en gris).

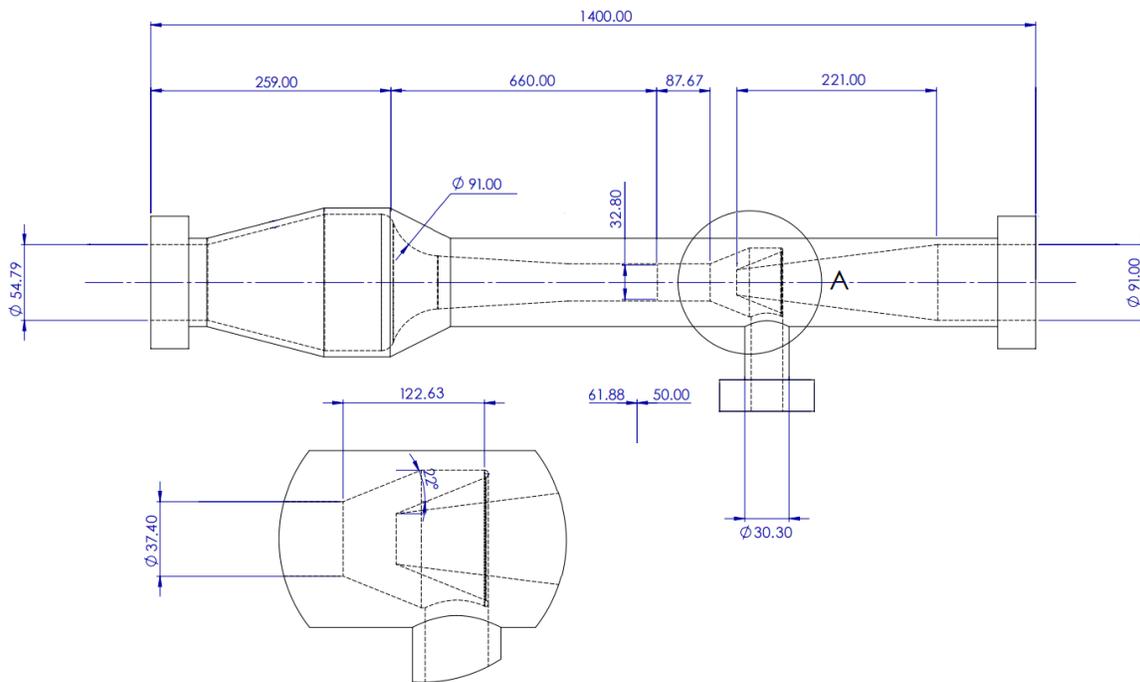


Figura 6-a. Cotas del separador supersónico – Cuerpo externo.

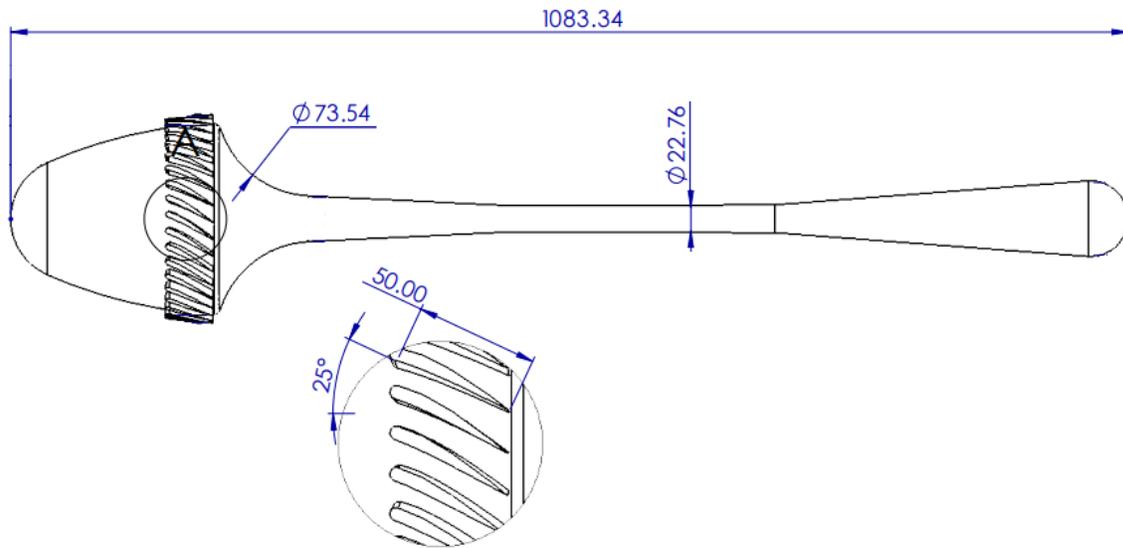


Figura 6-b. Cotas del separador supersónico – Cuerpo Interno.

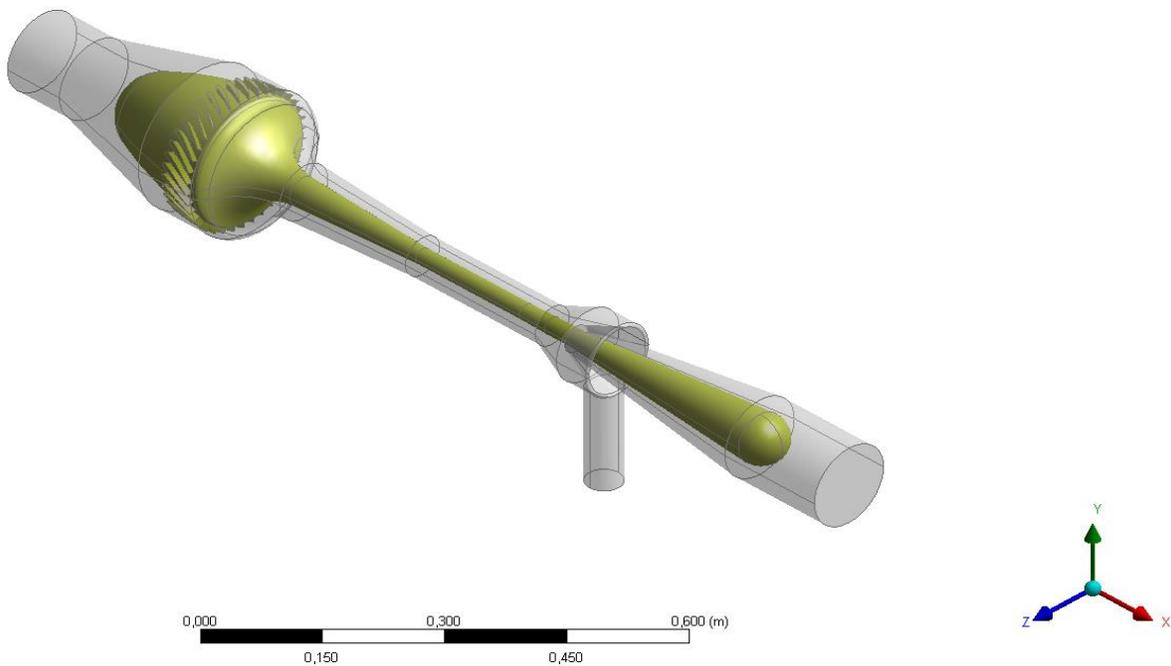


Figura 7. Vista isométrica del separador supersónico destacando el cuerpo interno.

Por otra parte, la Figura 8 presenta una vista lateral en la que destacan el cuerpo externo, el cuerpo interno y el área de flujo en la construcción final del separador.

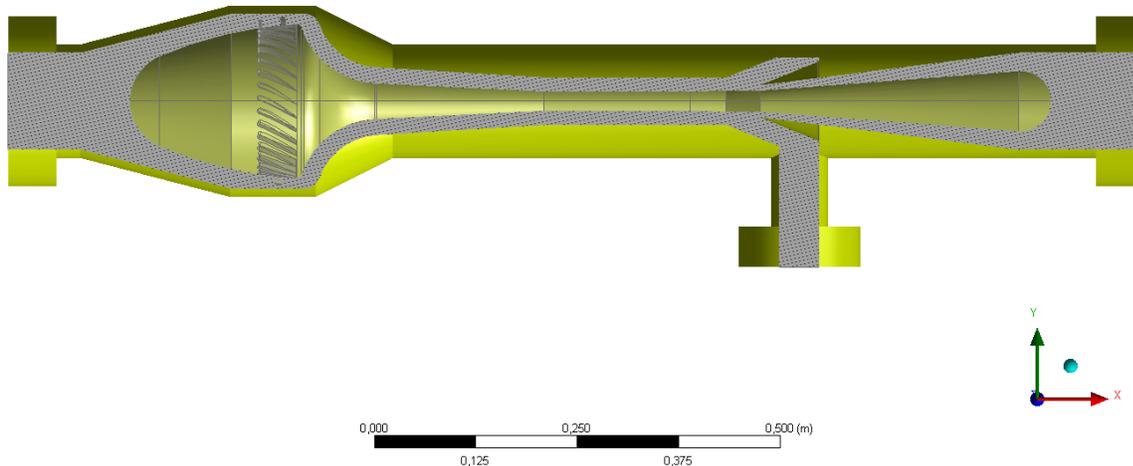


Figura 8. Corte lateral del separador supersónico.

7.3. Desarrollo y Evaluación del Mallado

La elaboración de las mallas se realizó con el software ANSYS MESHING. Esta es una de las etapas que más tiempo tomó en el desarrollo del proyecto ya que se probaron diferentes configuraciones de los parámetros del software con el fin de obtener: 1) una malla que cumpliera con las especificaciones de calidad establecidas en la literatura (Ardila Marín et al., 2016); 2) el menor número de elementos posibles y por consiguiente, 3) tiempos de cálculo cortos (Versteeg & Malalasekera, 2007).

En el proceso de la construcción de las mallas se probaron diferentes configuraciones del programa, tanto manuales como automáticas. En las configuraciones manuales se intentó dividir el dominio de flujo en volúmenes más pequeños con el fin de obtener mallas hexaédricas; sin embargo, esto no fue posible en todos los volúmenes y en aquellos en los que se obtenían elementos tetraedros no fue posible cumplir con los parámetros de calidad ortogonal y oblicuidad mínimas recomendadas para obtener resultados confiables, por lo que finalmente se decidió realizar un mallado automático de todo el dominio de flujo pero cambiando algunos parámetros del software que tienen una gran influencia al momento de realizar la construcción de la malla. La Tabla 5

muestra los parámetros que se tuvieron en cuenta al momento de construir las mallas y los valores que tomaron estos parámetros.

Tabla 5.

Valores de los parámetros de calidad de mallas usado en su construcción.

Parámetro	Valores
Relevance	[-70, -50, -20, 0, 20, 50, 70]
Relevance Center	[Fine]
Transition	[Slow]
Target Skewness	[0.01, 0.05, 0.2, 0.4]
Smoothing	[High]

Para las pruebas de mallas se llevaron a cabo varias simulaciones realizando combinaciones de los valores de Relevance y Target Skewness mostradas en la Tabla 5 buscando obtener el menor número de elementos junto con los mejores parámetros de calidad (Calidad ortogonal, oblicuidad y relación de aspecto). De acuerdo con los resultados obtenidos, se tomó como base para realizar las simulaciones del separador supersónico una malla con las características descritas en la Tabla 6.

Tabla 6.

Malla base para realizar las simulaciones.

Malla	Parámetros
Relevance	30
Relevance Center	Fine
Transition	Slow
Target Skewness	0.2
Smoothing	High

Las Figura 9, 10 y 11 muestran algunos cortes de la malla final utilizada para el desarrollo del proyecto.



Figura 10. Vista isométrica de la malla obtenida con las configuraciones de la tabla 6.



Figura 9. Corte isométrico de la malla obtenida.



Figura 11. Corte lateral de la malla obtenida con las configuraciones de la tabla 6.

7.4. Configuración del Dominio, la Física del Fenómeno y los Controles de Solución en el Software ANSYS Fluent.

Para llevar a cabo la simulación es necesario establecer y configurar las condiciones del proceso distribuidas en los distintos módulos del software, esta configuración corresponde principalmente al establecimiento de los modelos que permiten representar la física de los fenómenos que ocurren en el separador.

7.4.1. Configuración del dominio. En esta zona es posible comprobar la calidad de la malla, mejorarla y hasta convertir los elementos tetraedros de la malla en poliedros si es necesario, con el fin de disminuir el número de elementos. También es posible revisar las zonas en las que se ha dividido el dominio de trabajo, crear superficies para realizar análisis de resultados después de la simulación e incluso marcar o adaptar celdas de la malla de acuerdo con las necesidades de la simulación e incluso marcar o adaptar celdas de la malla de acuerdo con las necesidades de la simulación con el fin de obtener resultados más precisos. Aquí solamente se realizaron las

operaciones de rigor de chequeo de la malla y sus características de calidad; procedimientos que son recomendados por el mismo software antes de iniciar cualquier simulación.

7.4.2. Configuración de la física del fenómeno. En esta sección se inició estableciendo el fenómeno como estado estacionario; sin embargo, es importante destacar aquí que ANSYS Fluent resuelve los problemas de estado estacionario como si estuvieran en estado transitorio convergiendo a una solución cuando los resultados se vuelven invariables en el tiempo, por lo que así se haya establecido que el fenómeno se analizará en estado estacionario, se tendrá dentro de los controles de solución el número de Courant. El siguiente paso fue establecer el tipo de solver a utilizar. En ANSYS Fluent existen dos algoritmos de solución disponibles: el basado en presión y el basado en densidad. En el primero, la restricción de conservación de masa se logra resolviendo una ecuación de corrección de presión. La ecuación de presión se deriva de las ecuaciones de continuidad y momento de tal manera que el campo de velocidad, corregido por la presión, satisface la continuidad. Este algoritmo de solución requiere un proceso iterativo debido al acoplamiento de las ecuaciones y su no-linealidad. El solucionador basado en la densidad en ANSYS FLUENT resuelve las ecuaciones que rigen la continuidad, cantidad de movimiento, y el transporte de energía y especies simultáneamente. Históricamente, el solver basado en presión fue desarrollado con el fin de simular flujos incompresibles a baja velocidad mientras que el solver basado en densidad era usado para la simulación de flujos compresibles a alta velocidad; sin embargo, recientemente ambos métodos han sido extendidos y reformulados con el fin de que sean operativos en un amplio rango de condiciones de flujo más allá de su concepción original (ANSYS Inc, 2013). En este caso, debido a que por las condiciones del problema el flujo es altamente compresible, el tipo de solver que se usó fue Density-Based teniendo en cuenta que éste fue concebido para este tipo de problemas. En las condiciones de operación se estableció la presión

operativa en cero (0) para simplificar el problema y manejar una sola presión en las condiciones de entrada; además se fijó una gravedad en el eje Y de $-9.81 \frac{m}{s}$. Posteriormente se seleccionaron los modelos con los cuales se trabajó la simulación, se escogieron la ecuación de energía, el modelo RNG $\kappa - \varepsilon$ modificado para flujo giratorio con un factor de giro de 0,11 que de acuerdo con Guevara Luna (2015) es un valor que permite obtener resultados semejantes a los que se obtendrían utilizando el modelo de esfuerzos de Reynolds (RSM). A continuación, se escogió el modelo de fase discreta en el cual se hicieron las siguientes configuraciones:

- Se tomó en cuenta la interacción de las partículas con la fase continua.
- Se estableció un número de pasos máximo de 50.000 para permitir que todas las partículas escaparan y no quedara ninguna con trayectoria incompleta.
- Se creó una inyección de tipo superficie con una distribución de diámetro de Rosin – Rammler con diámetro máximo de $4 \mu m$ y diámetro mínimo de $0.1 \mu m$ y con un parámetro de esparcimiento de 1.62 con base a la bibliografía consultada (Wen *et al.*, 2012).
- El flujo másico de partículas corresponde al 3.30% del flujo de gas de acuerdo con los cálculos hechos en el software PRO II Process Engineering en el cual se calcularon las cantidades de flujo másico de cada uno de los componentes del gas natural que se condensa en el proceso de separación.
- La ley de arrastre utilizada fue la de alto número de Mach que es muy similar a la ley de arrastre esférica, pero se introducen correcciones para tener en cuenta partículas con un número de Mach superior a 0.4 y un número de Reynolds superior a 20. Además, se activó una opción que permite tener en cuenta la rotación de las partículas a través del modelo para la ley de arrastre rotacional de Dennis-*et-al.* (1980).

7.4.3. Configuración de los controles y métodos de solución. El primer paso en esta configuración es seleccionar el tipo de formulación que puede ser implícita o explícita. La diferencia entre estas dos formulaciones es, en términos generales, que en la formulación implícita los valores de todos los nodos para un mismo paso de tiempo se calculan simultáneamente mientras que en la formulación explícita se resuelve cada nodo uno a la vez (ANSYS Inc., 2013). Para flujo altamente compresible en estado estacionario es recomendable utilizar una formulación implícita dado que se llegará más rápido a la convergencia (ANSYS Inc., 2009).

El siguiente paso es escoger el tipo de método numérico para la solución de los términos convectivos del modelo de simulación (existente cuando se usa el solver basado en densidad); es posible escoger entre Roe-FDS (Roe Flux Difference Splitting) o AUSM (Advection Upstream Splitting Method). El flux tipo Roe-FDS divide los fluxes de una manera consistente con los eigenvalores del sistema, es el método establecido por defecto y se recomienda para la mayoría de los casos; sin embargo, el flux tipo AUSM provee una solución más exacta para las discontinuidades de choque y es menos susceptible inestabilidades numéricas que pueden afligir la captura de la onda de choque (ANSYS Inc., 2013), por lo que fue escogido el flux tipo AUSM.

Posteriormente se debe seleccionar la discretización espacial que incluye el tipo de gradiente, el orden de la discretización del flujo, de la energía cinética turbulenta y de la tasa de disipación turbulenta. Para el tipo de gradiente se puede escoger entre Green-Gauss basado en celdas, Green-Gauss basado en nodos y mínimos cuadrados basado en celdas; entre estos, los dos últimos tienen mayor precisión que el primero si la malla en la que se trabaja es una malla no estructurada. Finalmente se eligió para el gradiente el método de mínimos cuadrados basado en celdas ya que tiene un costo computacional menor y produce prácticamente los mismos resultados (ANSYS Inc., 2013). Para la discretización del flujo, la energía cinética turbulenta y la tasa de disipación

turbulenta, se puede elegir entre una discretización de primero, segundo o tercer orden. La discretización de tercer orden no se recomienda debido a que pueden presentarse problemas de convergencia cuando el flujo que se está considerando presenta discontinuidades como una onda de choque (ANSYS Inc., 2013). Entre las discretizaciones de primer y segundo orden es recomendable, cuando se trabaja con flujos con un número de Mach alto, iniciar con la de primer orden y después de algunas iteraciones cambiar a segundo orden; esto debido a que la discretización de segundo orden tiene mayor precisión, pero la de primer orden tiene mejor convergencia.

En la siguiente etapa se configuran el número de Courant (que como se explicó anteriormente, es un parámetro para establecer debido a que las ecuaciones acopladas que gobiernan el fenómeno son discretizadas en el tiempo ya sea para estado estable o transitorio; y, en el caso del estado estable, se asume que el tiempo marcha hasta que se alcanza una solución invariable en el tiempo) y los factores de relajación para la energía cinética turbulenta, la tasa de disipación turbulenta, la viscosidad turbulenta y para los modelos de calor conjugados. Estos factores de relajación son solo para las variables que al usar el solver basado en densidad se calculan de manera segregada y secuencial, las demás variables se calculan todas de manera acoplada por lo que no hay factores de relajación para ellas (ANSYS Inc., 2013). El número de Courant por defecto cuando se trabaja con Density-Based y formulación implícita es 5; sin embargo, inicialmente es recomendable usar un valor más bajo y a medida que avance la simulación se puede ir aumentando este valor dependiendo de la complejidad del problema. Para las simulaciones que se realizaron en este trabajo se inició con un número de Courant de 1 y se aumentó progresivamente hasta 5. Para los factores relajación de los parámetros de turbulencia se usó un valor de 0.6.

El último paso en esta etapa fue la configuración de los parámetros de convergencia en los que se establecieron unos valores residuales de 1×10^{-4} para la ecuación de continuidad, 1×10^{-6} para la ecuación de energía y 1×10^{-3} para los residuales de las demás variables. Una vez establecidos estos valores se inicializó la simulación y se dejó correr hasta que hubo convergencia.

7.5. Influencia de los parámetros geométricos en la construcción del separador supersónico.

Durante la construcción de la geometría del separador supersónico, se notó que, en los artículos estudiados durante la revisión del estado del arte, no reportan el valor del ángulo de elevación de la sección divergente. Por tal razón, fue necesario proponer un rango de valores y evaluar a través de algunas simulaciones cuál era aquel valor con el que se obtenían los valores más cercanos de temperatura, presión y velocidad a los reportado por Bian *et al.*, 2018. Los valores propuestos para este parámetro están especificados en la Tabla 7, junto con los resultados de presión, temperatura y velocidad obtenidos para cada uno de ellos, así como la diferencia porcentual entre estos valores y los de la investigación contra la cual se compararon (Bian *et al.*, 2018).

Tabla 7.
Resultados de la variación del ángulo de la sección divergente.

Ángulo de elevación de la sección divergente [Grados]	Presión [MPa]	Temperatura [k]	Velocidad [Ma]	Porcentajes de error [%]		
				P	T	V
1,00	1,47	202,50	1,54	92,35	5,55	10,74
1,20	1,40	200,00	1,57	83,19	4,25	9,02
1,25	1,19	191,63	1,67	55,71	0,12	3,01
1,50	1,33	198,10	1,59	74,03	3,26	7,66
1,75	1,34	197,70	1,60	75,34	3,05	7,41
2,00	1,32	197,30	1,60	72,72	2,84	7,08

Como se puede observar en la tabla, los mejores resultados se obtuvieron con un ángulo de elevación de $1,25^\circ$. También es de destacar en la tabla que los porcentajes de error con respecto a la presión son bastante altos; esto podría atribuirse a las diferencias geométricas que existen entre ambos equipos ya que en el estudio realizado por Bian et al. (2018) se evalúa el flujo de una mezcla de 80% CH_4 y 20% CO_2 a través de una boquilla sin cuerpo central (Figura 12); mientras que el separador diseñado en este trabajo cuenta con un cuerpo central, en la Figura 6.

Con el fin de verificar que la diferencia de presión es un efecto de la presencia del cuerpo central se procedió a construir una boquilla similar a la simulada por Bian *et al.* (2018) cuyos parámetros geométricos son mostrados en la Tabla 8. Se realizaron simulaciones empleando el modelo de turbulencia $\kappa - \varepsilon$ RNG modificado para flujo giratorio y otras cambiando solo el modelo de turbulencia al $\kappa - \omega$ usado por Bian et al., (2018); los resultados son mostrados en la Figura 13.

Tabla 8.

Medidas propuestas por Bian et al. (2018).

Dimensiones de la boquilla (Bian et al., 2018)	Valor
Diámetro de entrada de la boquilla	80 mm
Diámetro de la garganta	10 mm
Diámetro de salida	14.84 mm
Longitud de la sección de entrada	50 mm
Longitud de la sección convergente	140 mm
Longitud del separador	260 mm

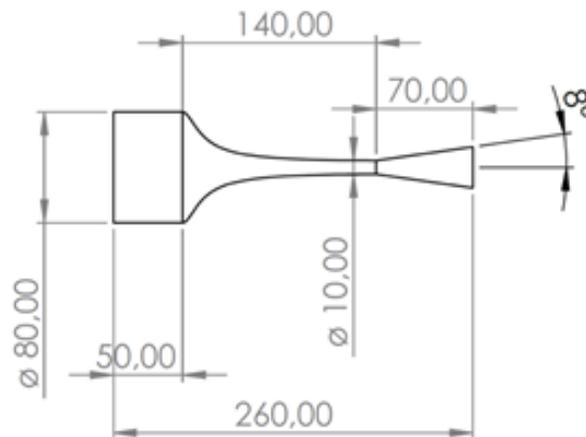


Figura 12. Boquilla propuesta por Bian et al. (2018).

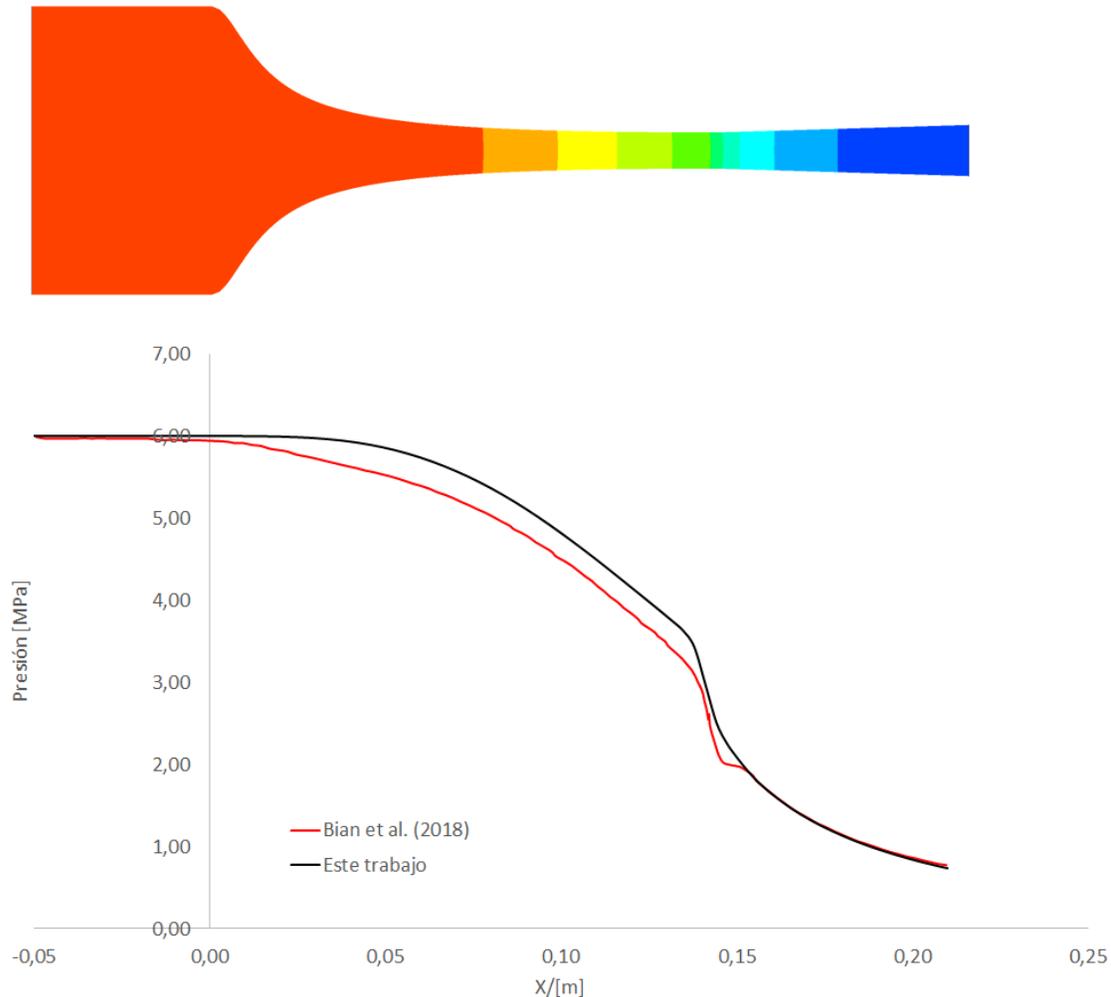


Figura 13. Comparación del perfil de caída de presión usando la geometría de Bian et al. (2018).

Como se observa en la Figura 13, persiste una diferencia en el valor de la presión a lo largo de la boquilla hasta el punto en el que empieza la zona divergente respecto al trabajo de Bian et al., no obstante, la máxima diferencia en la presión entre ambos trabajos se redujo de un valor de 55,71% a aproximadamente 9,84%. Además, la tendencia del perfil de presión es la misma en ambos trabajos y se obtienen las mismas condiciones de presión y temperatura justo antes de que se presente la onda de choque. De otro lado, los resultados mostraron que no existe diferencia en las predicciones del perfil de presión dentro de la boquilla al usar uno u otro modelo de turbulencia, ya que se obtuvo exactamente el mismo perfil de presión a lo largo de la boquilla mostrado por la

línea negra de la Figura 13. En otras palabras, los resultados muestran que no existen diferencias significativas al usar el modelo de turbulencia $\kappa - \varepsilon$ RNG modificado para flujo giratorio o el modelo $\kappa - \omega$ para las condiciones de esta simulación donde fue removido el cuerpo central del separador que es el que genera el flujo rotacional. También, se realizaron simulaciones adicionales variando el ángulo de apertura de la sección divergente de la geometría de Bian *et al.* (2018) y se encontró que modifica el valor final de las propiedades termodinámicas alcanzadas en la posición de la onda de choque. Estos resultados se muestran en la Figura 14.

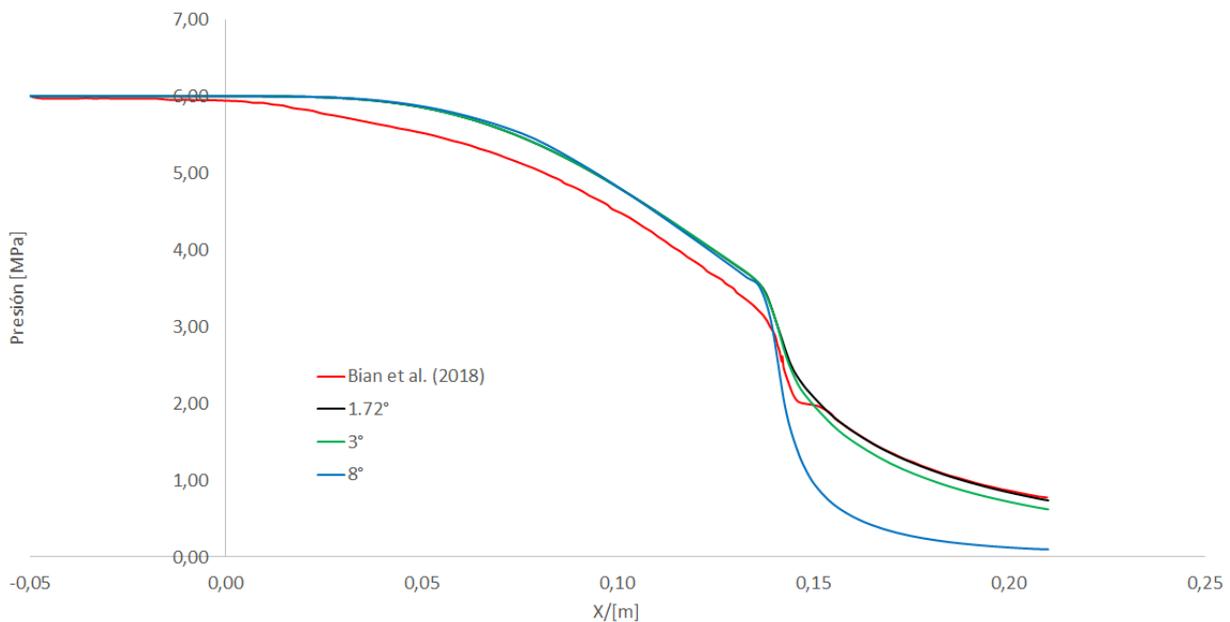


Figura 14. Comparación de ángulo de salida usando la geometría de Bian *et al.* (2018).

Como se puede observar en la Figura 14, a medida que se reduce el ángulo de salida de la sección divergente de la boquilla, también disminuye el valor final de la presión alcanzada en el punto donde se localiza la onda de choque. Por lo tanto, descartadas las variables geométricas ya mencionadas y el cambio del modelo de turbulencia, las diferencias que se mantienen en la zona intermedia de los perfiles de presión podrían deberse a que en la simulación realizada por Bian *et al.* (2018) se utilizó un modelo fenomenológico adicional que tiene en cuenta el proceso de

nucleación y crecimiento de gota del condensado dentro del separador; sin embargo, con el modelo matemático propuesto en este trabajo se obtiene una buena aproximación.

Finalmente, en las figuras 15 y 16 se muestran una comparación entre los perfiles de temperatura y velocidad obtenidos en este trabajo contra los mostrados por Bian et al. (2018). Se observa, que los resultados concuerdan desde el punto de vista cualitativo, sin embargo, tienen una diferencia en el valor numérico de aproximadamente 10%, lo que nos permite decir que los modelos de turbulencia y termodinámicos seleccionados para el desarrollo de este trabajo producen resultados confiables.

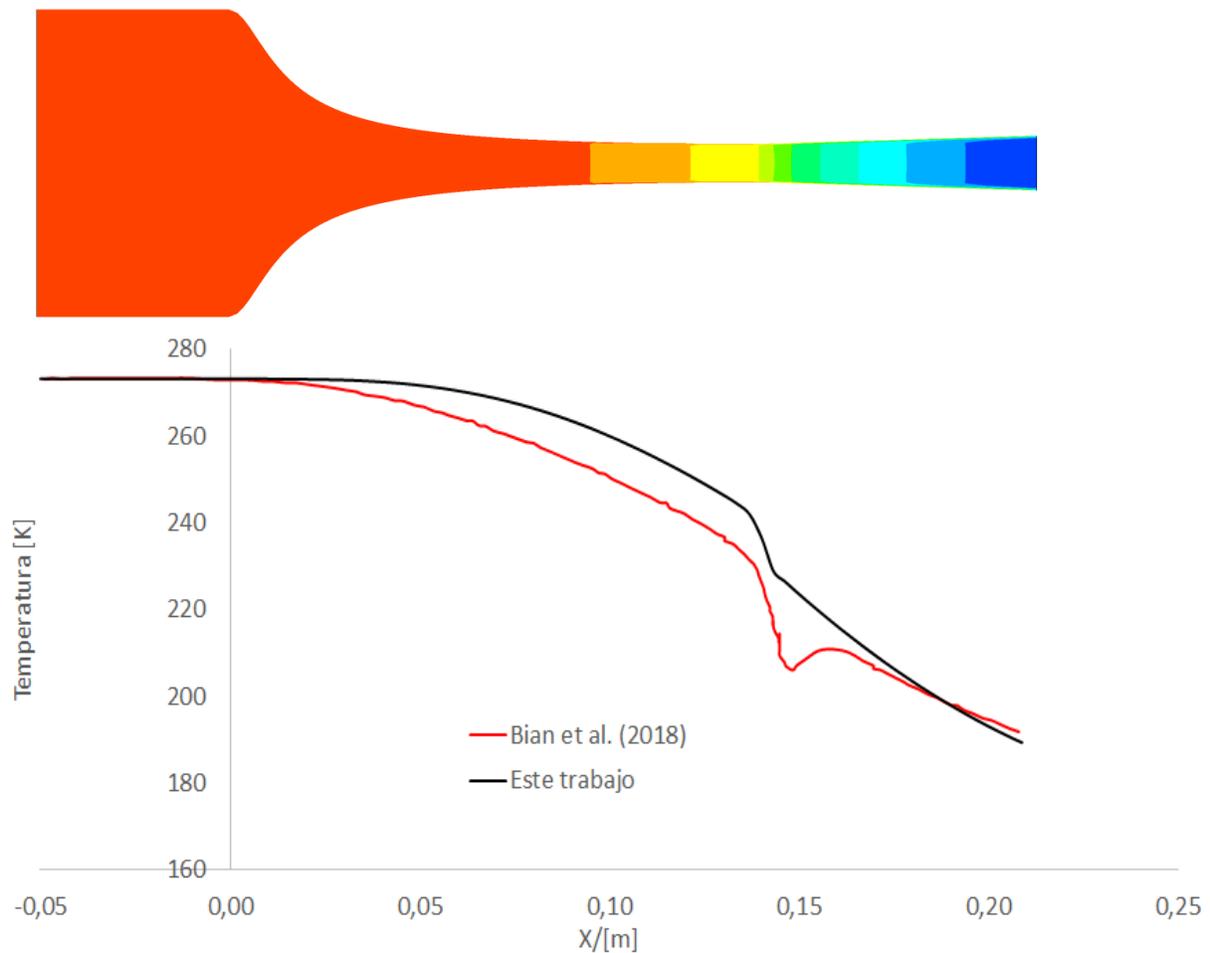


Figura 15. Comparación del perfil de temperatura usando la geometría de Bian et al. (2018).

Como se observa en la Figura 16 se puede comprobar que el perfil de velocidad que se obtiene en la simulación también representa una buena aproximación de los resultados obtenidos por Bian et al. (2018). Las diferencias en los perfiles de temperatura y velocidad, al igual que para el perfil de presión, podrían deberse al modelo adicional utilizado para simular el proceso de condensación.

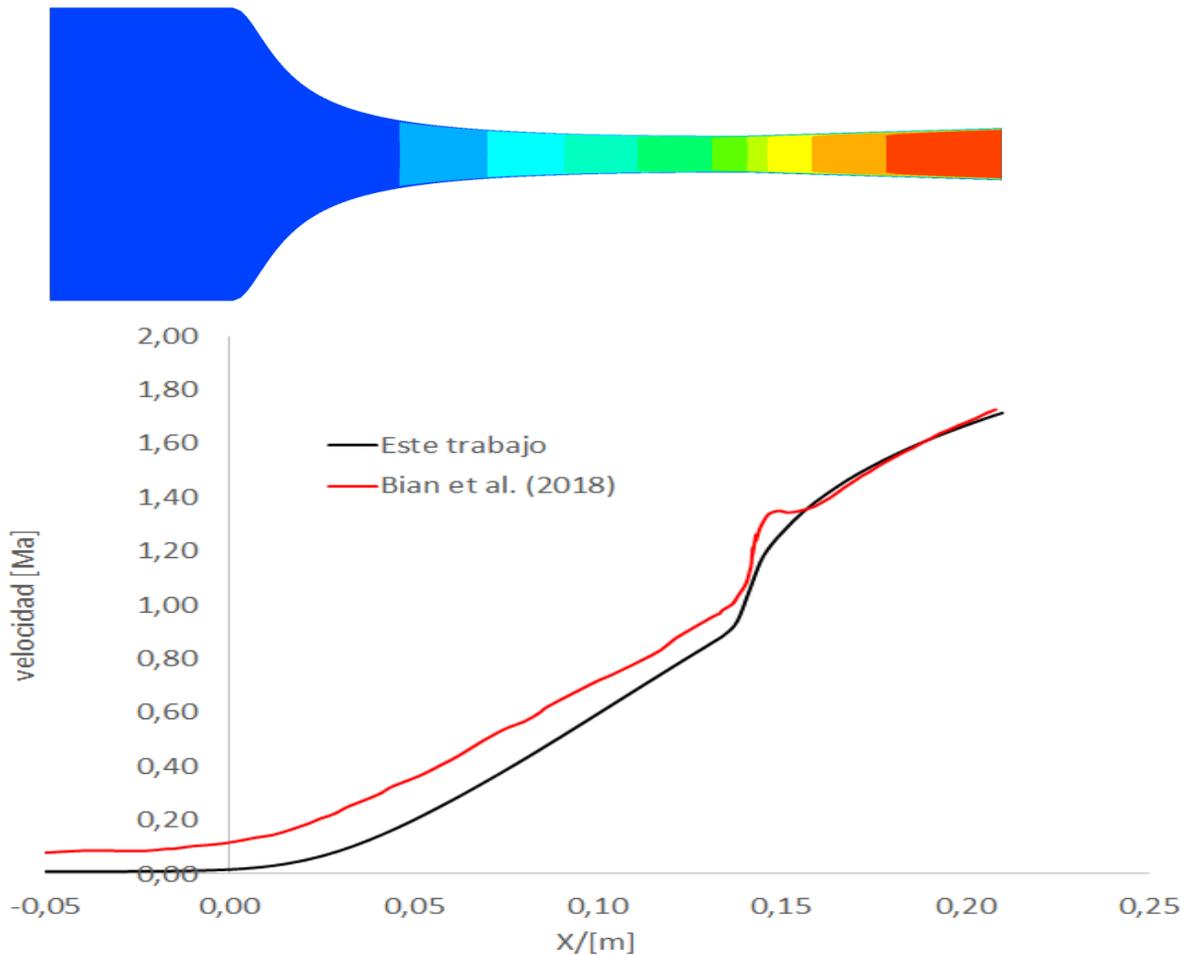


Figura 16. Comparación del perfil de velocidad usando la geometría de Bian et al. (2018).

Por último, la Figura 16 presenta una comparación entre los perfiles de velocidad usando la misma geometría de Bian et al. (2018) pero con el modelo matemático propuesto en este trabajo y, siguiendo la tendencia mostrada en los perfiles de presión y temperatura mostrados en las Figuras 14 y 15, estos resultados pueden considerarse como una buena aproximación de los datos

obtenidos por Bian et al. (2018); y así como en los dos perfiles anteriores, las diferencias parecen estar ligadas al modelo adicional utilizado para la condensación.

7.6. Comparación de la localización de la onda de choque en la boquilla convergente-divergente.

De acuerdo con la metodología presentada se realizaron varias simulaciones con el fin de comparar los resultados obtenidos con investigaciones de otros autores y de esta forma validar el diseño presentado del separador supersónico. Una de las comparaciones hechas fue contra los datos publicados por Arina (2004), en la que se analiza el perfil de presión de un flujo de aire y la localización de la onda de choque en la zona convergente-divergente del separador. En este caso Arina desarrolló un código de programación para resolver el sistema de ecuaciones de transporte que describen el fenómeno que ocurre en esta zona del separador. Esta comparación se realizó usando la misma geometría presentada por Arina (2004) pero con el modelo matemático propuesto en el desarrollo de este trabajo. La Ecuación (17)(17) muestra la relación utilizada para la construcción de la geometría usada por Arina (2004) mientras que la Tabla 9 muestra las condiciones de frontera para la simulación.

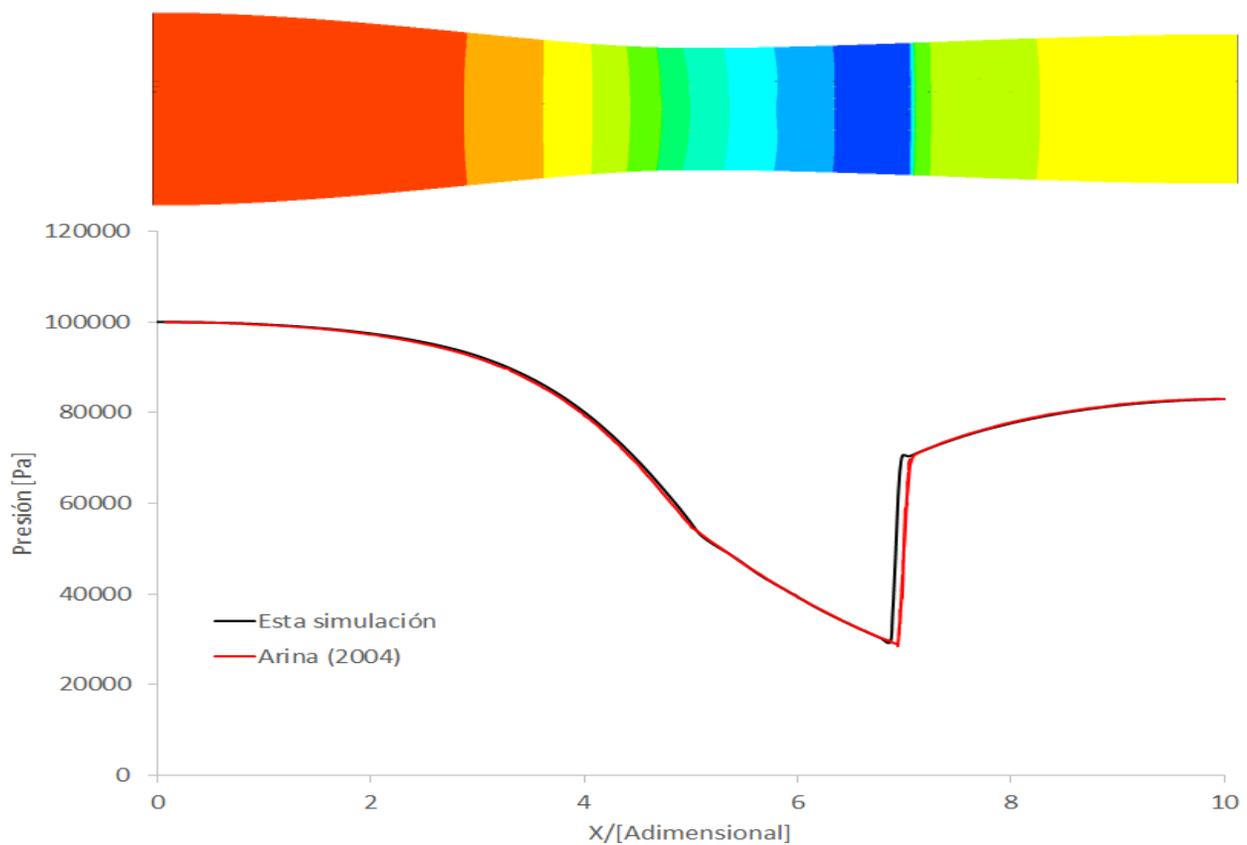
$$\begin{aligned}
 A(x) &= 2.5 + 3 \left(\frac{x}{x_{th}} - 1.5 \right) \left(\frac{x}{x_{th}} \right)^2 & (x \leq x_{th}) \\
 A(x) &= 3.5 - \frac{x}{x_{th}} \left[6 - 4 \frac{x}{x_{th}} + \left(\frac{x}{x_{th}} \right)^2 \right] & (x \geq x_{th})
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

En la ecuación (17), $A(x)$ representa el área transversal de flujo a lo largo de la sección y x_{th} representa la posición de la garganta. Para este caso específico el área en la garganta tiene un valor de 1 y se encuentra ubicada en $x = 5$, mientras que la longitud máxima un valor de 10.

Tabla 9.*Condiciones de frontera para la simulación.*

Características	Presión [Pa]	Temperatura [K]	Velocidad [Ma]
Entrada	100.000	288	0,239543
Salida	83.049	-	-

Como se puede observar en la Figura 17, con el modelo matemático propuesto para el separador supersónico se logra capturar la onda de choque aproximadamente en la posición reportada por Arina, (2004).

**Figura 17.** Comparación del perfil de presión utilizando la geometría de Arina (2004).

Además, en la Figura 17 se presenta una pequeña diferencia en la trayectoria que sigue la recuperación de la presión justo después de llegar a la onda de choque. Esta desigualdad en la recuperación de la presión se debe a que la onda de choque se produce unos milímetros antes; sin

embargo, una vez se recupera la presión la diferencia desaparece y el perfil de presión sigue la misma trayectoria hasta finalizar la sección divergente.

7.7. Comparación contra datos experimentales de la caída de presión, temperatura y número de Mach en el separador.

Con el propósito de corroborar que tan cerca está el modelo propuesto del funcionamiento real de la tecnología de separación supersónica, se realizaron simulaciones para comparar contra datos experimentales y de simulación reportados por Prast *et al.*, (2006). A diferencia de Bian y Arina, Prast simuló el separador supersónico, es decir boquilla y cuerpo central. En las Tablas 10 y 11, se muestra la composición del gas natural empleada y las condiciones de operación usadas en la simulación. La Figura 18, presenta los detalles de la comparación realizada.

Tabla 10.

Composición molar del Gas Natural para validar la simulación.

Componentes	% Molar
Metano	93,869
Etano	3,270
Propano	0,763
i-Butano	0,122
n-Butano	0,153
n-Pentano	0,103
C6+	0,000
Nitrógeno	1,720
Dióxido de carbono	0,001

Nota 10-I. Tomado de (M. A. Guevara Luna, 2015)

Tabla 11.

Condiciones de operación y características del Gas Natural para validar la simulación.

Características	Valor
Flujo	20 MMscfd
Temperatura	290 K
Presión	3 MPa
Contenido de agua	27 lbH ₂ O/MMscf
Contenido de ácido sulfhídrico	0 % V/V
Punto de rocío	120 °F

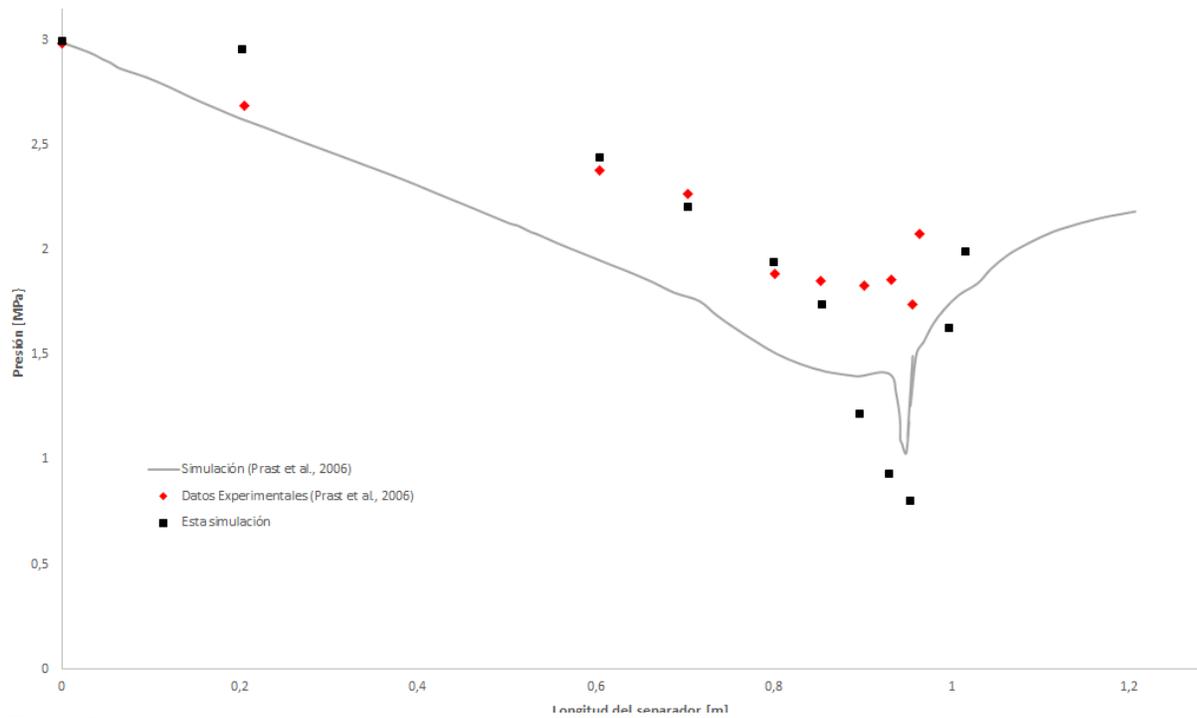


Figura 18. Comparación del perfil de presión en el separador contra datos experimentales.

Como se puede observar, el perfil de presión obtenido a lo largo del separador en esta simulación es muy similar al perfil de los datos experimentales exceptuando la zona cercana al lugar donde se produce la onda de choque en donde sí se distancian bastante los dos perfiles; sin embargo, comparando contra los datos obtenidos por Prast et al. (2006) en su simulación para este mismo proceso es posible observar que en esta zona ellos también registran una caída de presión más baja de la que se presenta en los datos experimentales. Estos resultados proporcionan un buen indicio de que el campo de flujo está siendo simulado correctamente. Por otra parte, se logró una mejora con respecto a los resultados presentados por Belalcázar Cerón (2017) donde al analizar estos mismos datos obtiene un factor de correlación $R = 0.64$ entre el perfil de presión experimental y el perfil de presión obtenido a través de la simulación. En la Figura 19, se presenta la correlación obtenida para los perfiles de presión (experimental y simulación) en este trabajo.

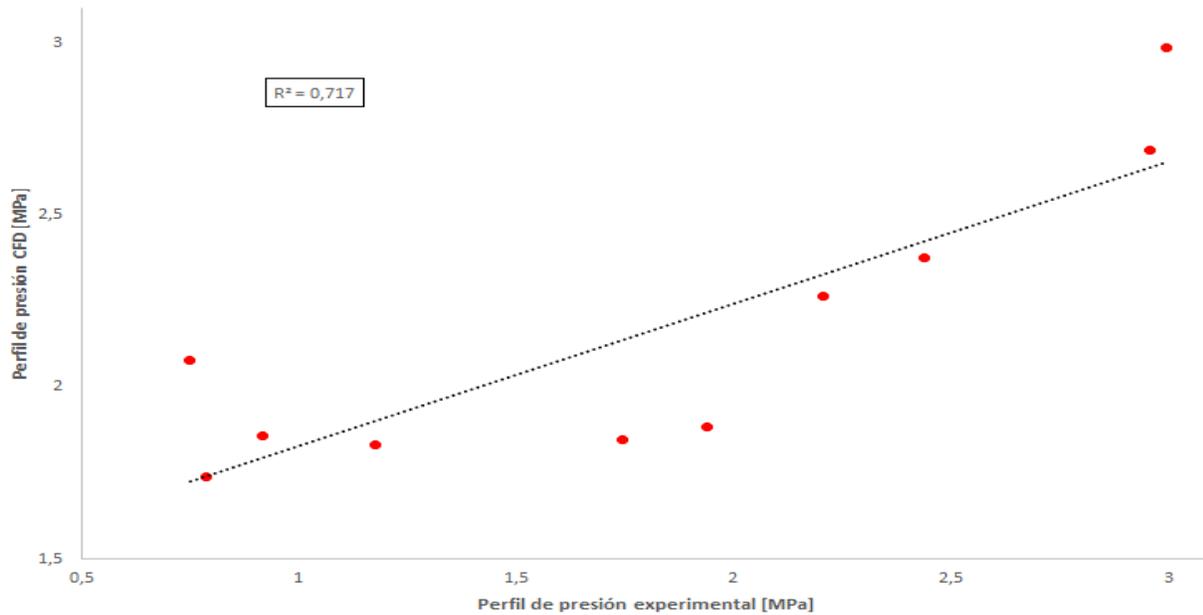


Figura 19. Correlación entre el perfil de presión experimentales y el perfil obtenido a través de CFD.

Como se puede observar, el factor de correlación para los resultados obtenidos en este trabajo es $R = 0.717$ y aunque la relación entre los dos perfiles aún puede mejorarse, los datos obtenidos por el modelo de separador supersónico propuesto en este trabajo sí representan un avance con respecto a estudios anteriores (Belalcázar Cerón & Guevara Luna, 2017).

7.8. Comparaciones contra datos de simulación de otros investigadores.

Se realizó una simulación más para comparar contra resultados de simulación de presión temperatura y número de Mach obtenidos por Wen et al., (2012) usando como fluido de trabajo una mezcla de 96.044% de metano, 2.98% de etano y 0.976% de propano a unas condiciones de entrada de 14 MPa y 255 K en un separador sin cuerpo central. Como se puede apreciar en la Figura 21, siguiendo la metodología empleada en la comparaciones anteriores, se realizó una simulación utilizando la geometría propuesta por Wen et al. (2012), descrita en la Tabla 12, pero con los modelos de turbulencia y termodinámico que se han venido trabajando durante el

desarrollo de este trabajo. Asimismo, la Figura 20 muestra un esquema con las dimensiones características del separador propuesto por Wen et al. (2012).

Tabla 12.

Dimensiones características del separador de Wen et al. (2012).

Dimensiones del separador diseñado por Wen et al. (2012).	Valor
Diámetro de entrada de la boquilla	130 mm
Diámetro de la garganta	36.71 mm
Diámetro de salida	81.80 mm
Longitud de la sección convergente	109.56 mm
Longitud de la sección divergente	564.81 mm
Longitud del difusor	579.42 mm
Longitud del separador	1373.79 mm

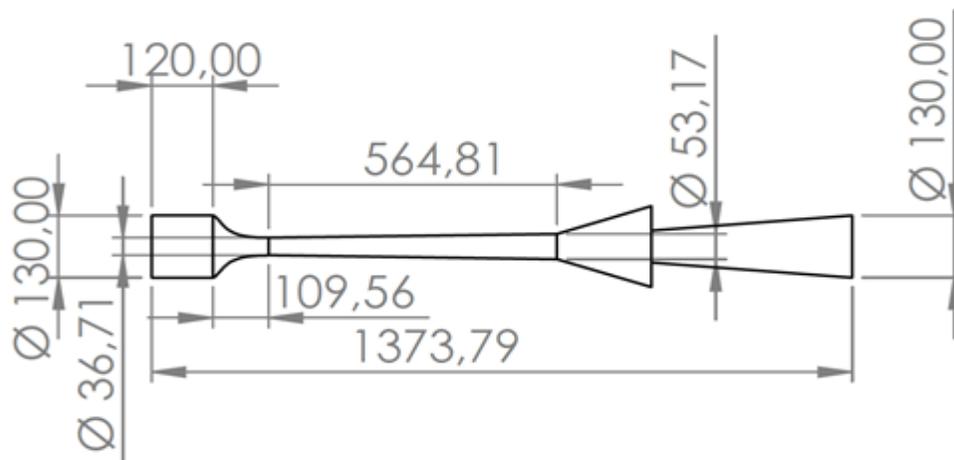


Figura 20. Esquema del separador propuesto por Wen et al. (2012). Nótese que este sistema no tiene cuerpo central; sin embargo, a diferencia de los equipos simulados por Arina y Bian, este posee recolector y difusor.

Como es posible verificar en la Figura 21, los resultados obtenidos son muy similares a los obtenidos por Wen et al. (2012); esto se debe principalmente a que en el trabajo de Wen et al. (2012) se utilizó el mismo modelo termodinámico que en este trabajo (Peng Robinson), se usó el modelo de turbulencia $\kappa - \varepsilon$ estándar, similar al propuesto en este trabajo para el desarrollo de las simulaciones (y aún más teniendo en cuenta que la geometría no presenta un cuerpo central) y finalmente, es importante destacar que no se utilizaron ni se programaron modelos fenomenológicos adicionales a los que se encuentran disponibles en el software ANSYS Fluent.

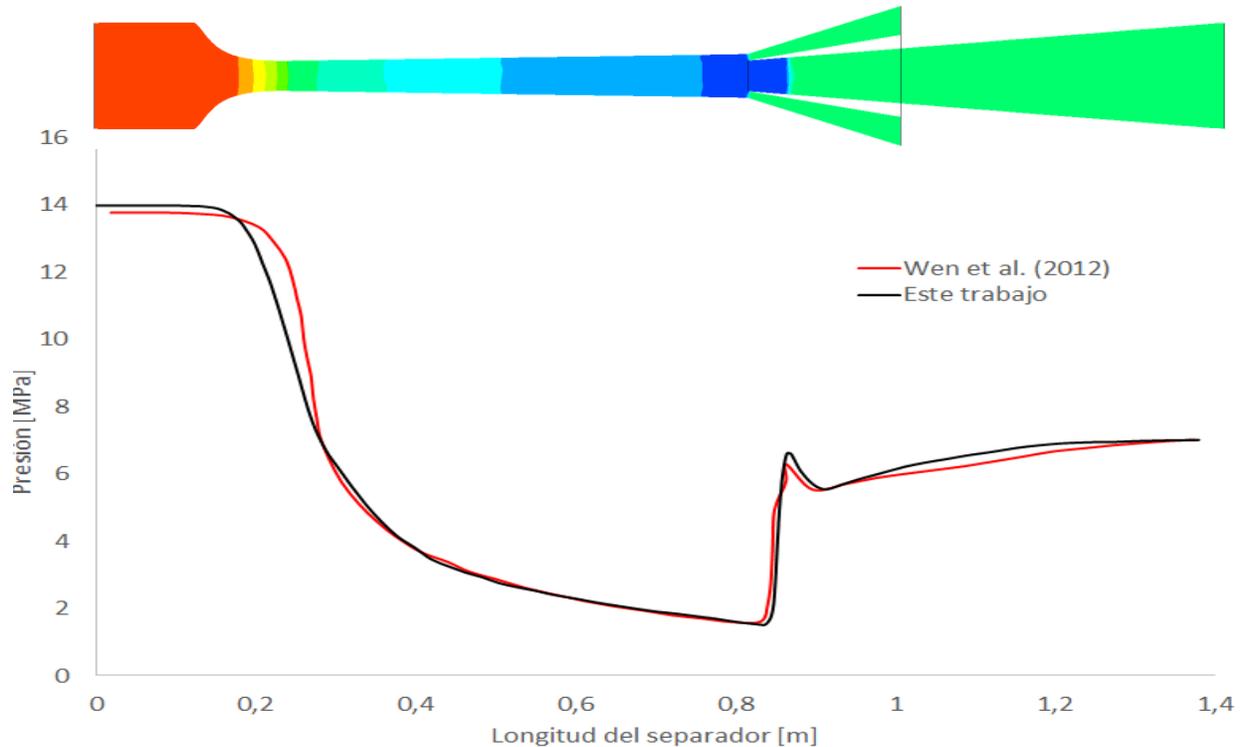


Figura 21. Comparación del perfil de presión utilizando la geometría de Wen et al. (2012).

Al igual que lo sucedido en los perfiles de presión, los perfiles de temperatura y de velocidad presentados en las Figuras 22 y 23, siguen el mismo comportamiento cualitativo que los resultados presentados por Wen *et al.* (2012); para el perfil de temperatura específicamente, presentando en la Figura 22, se puede observar que existen una diferencia en los valores a medida que se acerca a la posición de la onda de choque, sin embargo, la diferencia máxima de temperatura es 8 K y representa una variación aproximada del 5,58%.

Finalmente, en el perfil de temperatura mostrado en la Figura 23 sigue la tendencia de las Figuras 21 y 22 y se presenta un ajuste aceptable para los valores obtenidos por Wen *et al.* (2012) mostrando la misma tendencia que sus datos.

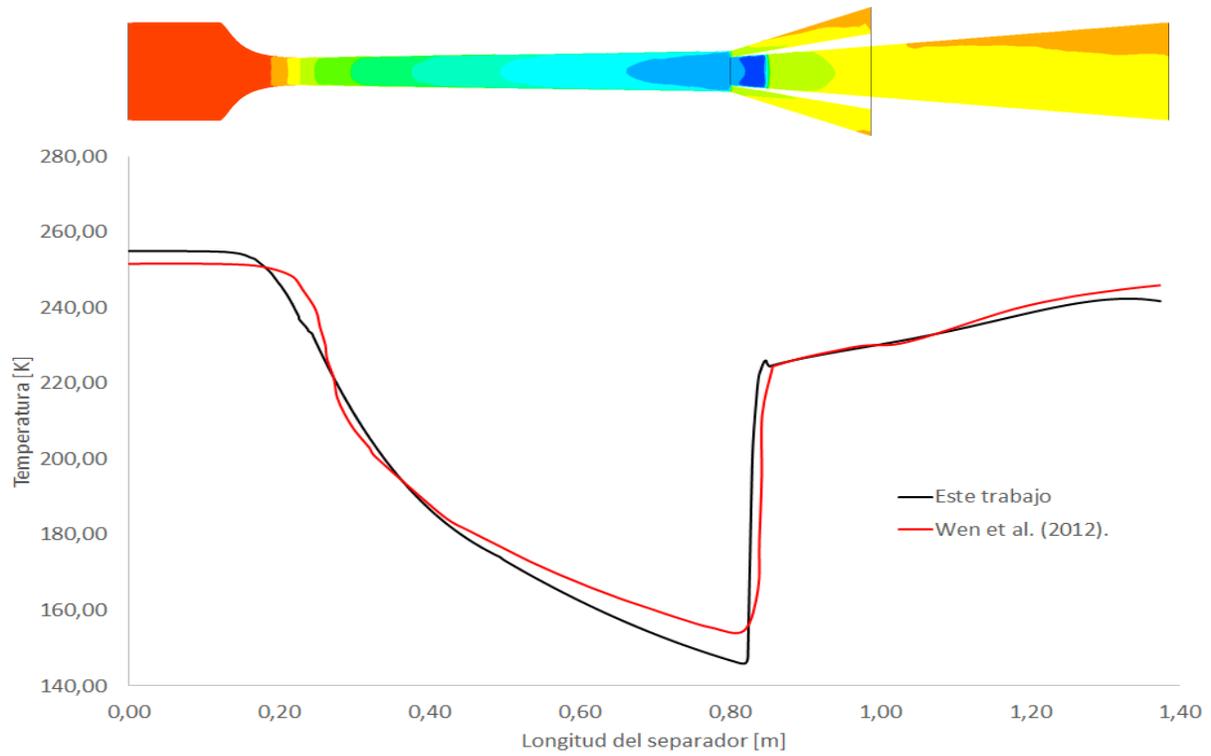


Figura 22. Perfil de temperatura utilizando la geometría de Wen et al. (2012).

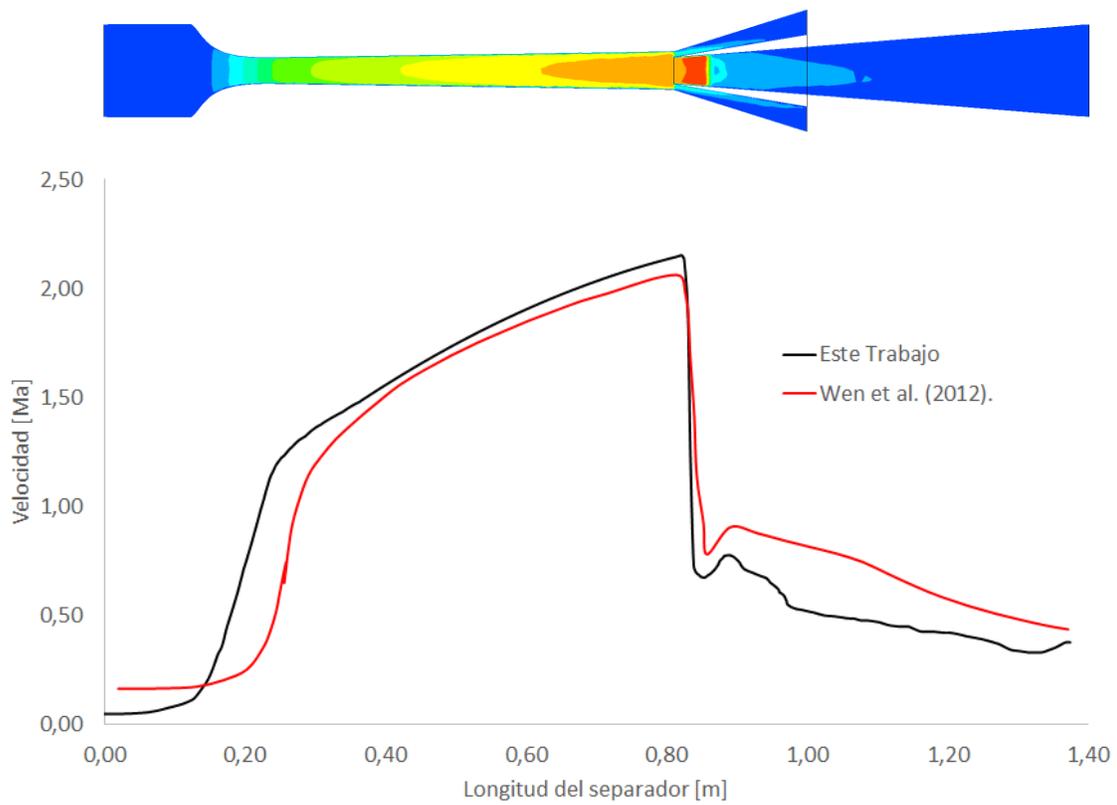


Figura 23. Perfil de velocidad usando la geometría de Wen et al. (2012).

Es importante destacar que, de los tres perfiles, el perfil de velocidad es el que presenta mayores diferencias con respecto a los datos contra los cuales se está comparando; no obstante, los resultados obtenidos concuerdan cualitativamente y la diferencia entre los dos perfiles el punto crítico donde se localiza la onda de choque es de aproximadamente 4,37%.

Finalmente, teniendo en cuenta todas las comparaciones realizadas y los resultados presentados, es posible avalar el modelo propuesto para el proceso de separación supersónica (diseño geométrico y modelamiento matemático) con el fin de evaluar el funcionamiento de este al simular el proceso de separación de los compuestos pesados de un gas natural colombiano.

7.9. Resultados obtenidos para un gas natural colombiano a condiciones de presión y temperaturas dadas.

Una vez validada la simulación, se utilizaron los datos recolectados de los campos colombianos con el fin de realizar predicciones y comparar resultados entre el proceso convencional y el uso de un separador supersónico en campos de producción de gas natural pequeños. La composición del gas natural se muestra en la Tabla 13, sus condiciones de operación en la Tabla 14 y sus propiedades en la Tabla 15. Los datos presentados en la Tabla 15 fueron calculados en el software HYSYS de tal modo que en el software ANSYS Fluent se creó un solo fluido con las propiedades de toda la mezcla de acuerdo con las composiciones presentadas en la Tabla 13. En el apéndice Figura A 1 se presentan las aproximaciones realizadas para obtener una curva para la capacidad calorífica, la conductividad térmica y la viscosidad de la mezcla.

Tabla 13.
Composición molar de un Gas Natural colombiano.

Componentes	% Molar
Metano	84,813
Etano	8,323
Propano	2,695
i-Butano	0,421
n-Butano	0,635
i-Pentano	0,277
n-Pentano	0,216
n-Hexano	0,258
n-Heptano	0,180
n-Octano	0,096
n-Nonano	0,045
n-Decano	0,011
Nitrógeno	0,148
Dióxido de carbono	1,882

Nota 13-1. Datos provistos por el Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas – CDT.

Tabla 14.
Condiciones de operación del Gas Natural.

Características	Valor
Flujo	2,2 kg/s
Temperatura	308,05 K
Presión	6,2 MPa
Contenido de agua	38,8 lbH ₂ O/MMscf

Tabla 15.
Propiedades del gas natural utilizado.

Propiedad	Valor
Peso Molecular	19,72 kg/kmol
Presión Crítica	4637214,68 Pa
Temperatura Crítica	212,79 K
Volumen Crítico	0,0193 m ³
Factor Acéntrico	0,0317

Para el desarrollo de esta simulación se introdujo el gas natural, se escogió el modelo de Peng Robinson para modelar su densidad, se insertaron los modelos a utilizar para la capacidad calorífica C_p , la conductividad térmica, la viscosidad, el peso molecular, los valores críticos para

presión, temperatura y volumen y el factor acéntrico. Todas estas propiedades Para las condiciones de entrada se estableció el flujo másico de entrada, la temperatura y la presión de entrada, así como el porcentaje de intensidad turbulenta y el diámetro hidráulico.

7.9.1. Líneas de flujo. Como podemos observar en las líneas de flujo presentadas en la Figura 24, una vez el gas natural ingresa en el separador, este pasa a través de los álabes estáticos y se da un flujo en forma de remolino, crucial para garantizar que haya separación de los compuestos pesados. A medida que el gas avanza a lo largo del separador va aumentando su velocidad y disminuyendo su temperatura y su presión, lo que permite que se condensen los compuestos más pesados formando gotas que debido al flujo giratorio se van hacia las paredes del separador.

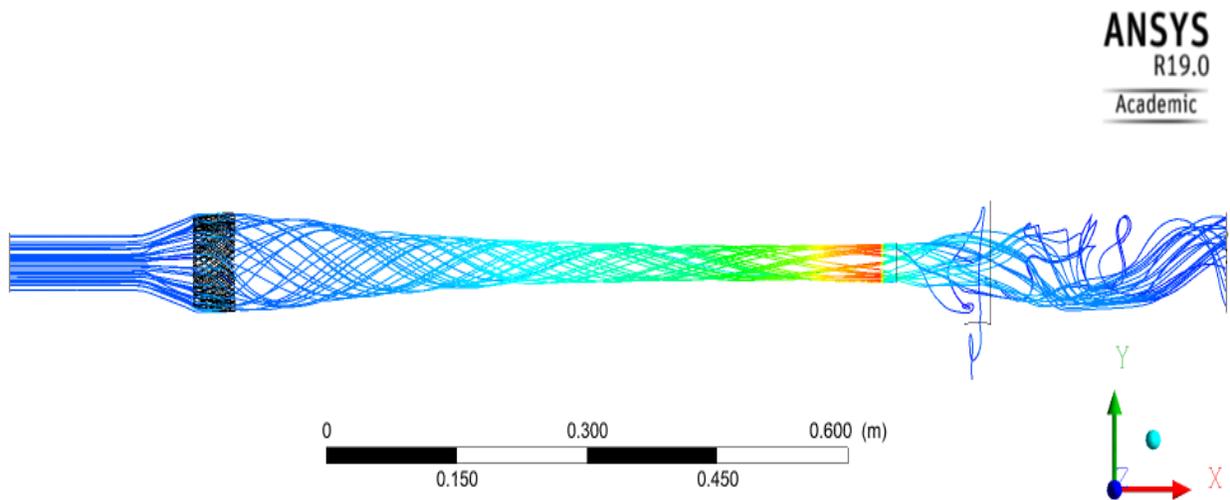


Figura 24. Líneas de flujo de la simulación.

Unos milímetros antes de llegar al recolector, se produce una onda de choque donde el flujo cambia abruptamente del régimen supersónico al régimen subsónico y se empiezan a recuperar la temperatura y la presión. Por otra parte, las gotas que iban sobre las paredes del separador pasan

al recolector y salen del equipo mientras que el gas seco fluye hacia el difusor y finalmente abandona el separador.

7.9.2. Perfiles de presión y temperatura en el separador.

7.9.2.1. Perfil de presión. Como se observa en la Figura 25, la presión disminuye a lo largo del separador desde 6,25 MPa hasta un valor de 1,31 MPa en la zona donde se produce la onda de choque; en este punto se presenta un cambio súbito y la presión sube por el cambio de régimen de flujo de supersónico a subsónico.

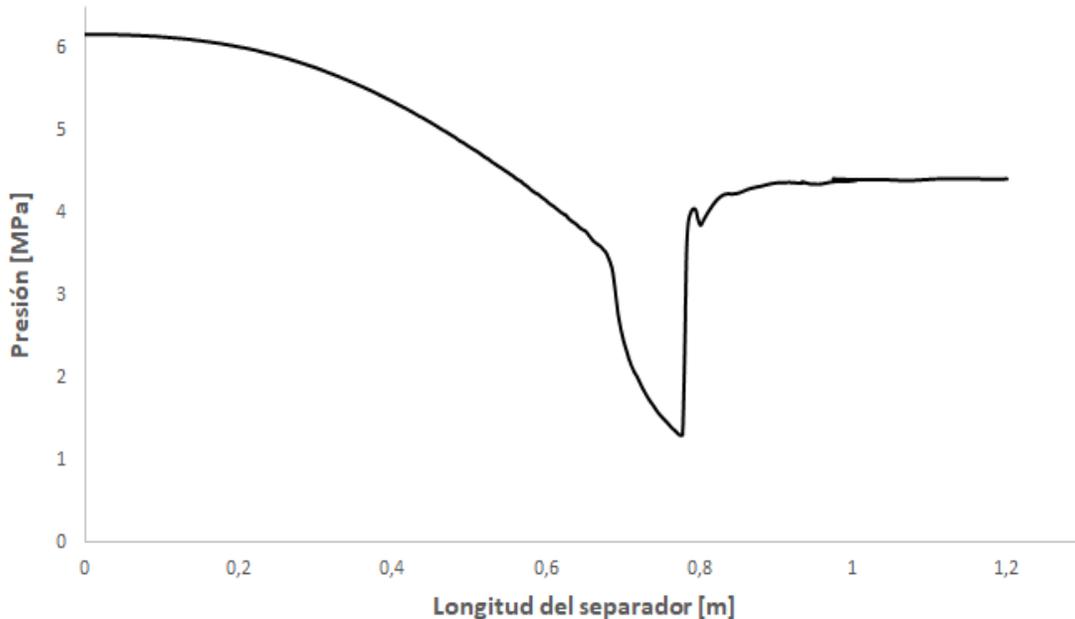


Figura 25. Perfil de presión para un gas natural colombiano.

7.9.2.3. Perfil de temperatura. A medida que el gas fluye a través del separador la temperatura va disminuyendo como se ve en la Figura 25 hasta llegar a un valor de 228 K en el punto donde se presenta la onda de choque; aquí se presenta un incremento súbito debido, igual que el incremento en la presión, al cambio de régimen de flujo de supersónico a subsónico.

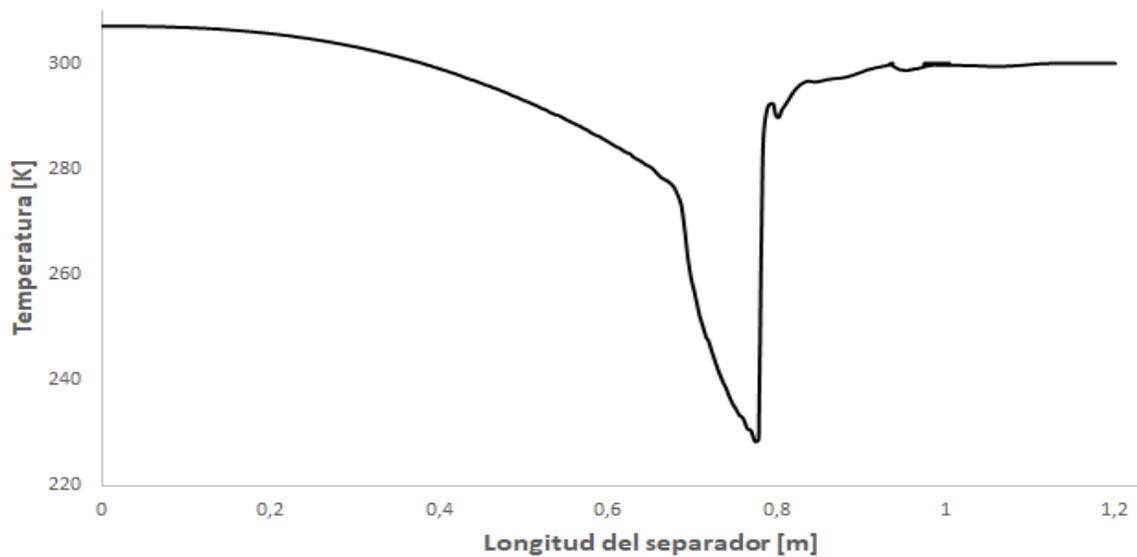


Figura 26. Perfil de temperatura de un gas natural colombiano.

7.9.3. Recuperación de la presión. De acuerdo con los datos obtenidos de la simulación y la presión de entrada, se puede calcular el porcentaje de recuperación de la presión que para esta simulación se presenta en la Tabla 16.

Tabla 16.

Porcentaje de recuperación de la presión.

Característica	Presión [Pa]
Entrada	6.205.000
Salida	4.410.181
% de recuperación	70,39

Este porcentaje de recuperación de la presión es alto comparándolo contra resultados de otros investigadores como el obtenido por Lammers (2006) para el diseño de la empresa Twister con el que obtuvo una recuperación del 60%. Esto representa un ahorro en los costos de recompresión del gas natural en procesos posteriores al tratamiento.

7.9.4. Recuperación de los líquidos de gas natural. La caída de presión y de temperatura, en conjunto con el flujo giratorio que adquiere el gas natural al pasar por los álabes estáticos, permite que se dé la condensación de los compuestos pesados. Se inyectaron 600

partículas que representan el flujo másico correspondiente a una fase líquida del 3.32% del flujo de entrada. La Tabla 17 presenta el flujo de partículas de condensados del gas natural que van a través de la salida lateral y aquellos que siguen por la salida del gas seco, así como el porcentaje de recuperación de líquidos de gas Natural.

Tabla 17.

Porcentaje de recuperación de líquidos de gas natural.

Zona	Número de partículas
Entrada	600
Salida Lateral	440
Salida frontal	160
% de recuperación	73,33

Este porcentaje de recuperación de líquidos de gas natural obtenido por el modelo propuesto del proceso de separación supersónica es un 9,3% más elevado que el obtenido por Schinkelshoek y Epson (2008) para la empresa Twister. Además, se realizó una simulación en HYSYS para conocer la cantidad condensada de cada uno de los compuestos presentes en el gas natural. Estos resultados se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18.

Porcentaje de condensación de cada uno de los componentes presentes en el gas natural.

Compuesto	Porcentaje del flujo molar condensado
Metano	0,477
Etano	5,465
Propano	26,354
Isobutano	56,304
n-Butano	68,406
Isopentano	88,322
n-Pentano	92,363
n-Hexano	98,431
n-Heptano	99,676
n-Octano	99,934
n-Nonano	99,985
n-Decano	99,996
Nitrógeno	0,092
CO ₂	1,930
H ₂ O	28,525

Como se puede observar en la Tabla 18, a medida que aumenta el peso molecular de las fracciones de hidrocarburos que componen el gas natural, va aumentando también el porcentaje que se condensa de cada compuesto. Es importante resaltar que desde el pentano hasta el decano se condensa más del 92% del flujo molar que ingresa de estos compuestos y que, de esta manera, el separador cumple con la función para la cual fue diseñado que es la remoción de los compuestos pesados presentes en el gas natural.

Finalmente es importante mencionar que, así como la mayoría de los condensados de gas natural abandonan el separador a través de la salida lateral, por esta misma también se va un 14,24% del flujo másico de gas que ingresa.

8. Conclusiones

A través del uso de la dinámica computacional de fluidos se desarrolló un modelo para evaluar la viabilidad de la tecnología de separación supersónica a un campo de gas natural colombiano con el propósito de remover los compuestos pesados. Una vez realizadas todas las simulaciones correspondientes, se puede concluir que:

- La revisión del estado del arte (artículos, patentes, libros) y los modelos matemáticos utilizados en la simulación de la tecnología de separación supersónica permitieron la construcción de un modelo geométrico y matemático que a través del software de ANSYS se utilizó para simular la separación de los compuestos pesados de un gas natural colombiano.
- El estudio de las variables representativas del proceso de separación supersónica que ocurre en el separador permitió entender con claridad el fenómeno de la onda de choque y como éste afecta la condensación y remoción de los compuestos pesados del gas natural.

- En la simulación del proceso de separación supersónica de un gas natural colombiano se obtuvo una recuperación de la presión de entrada del 70,39%, que representa una mejora con respecto a estudios de otros investigadores. Del mismo modo, se obtuvo una eficiencia en la recuperación de líquidos del gas natural del 73,33%, que es un 9,3% más alta que otros estudios de investigadores que han tratado este mismo proceso.
- Con el fin de que la información obtenida en las simulaciones realizadas en este trabajo tuvieran validez, se realizaron comparaciones contra datos experimentales y de simulación de otros investigadores bajo las mismas condiciones de frontera y de fluido de trabajo que ellos utilizaron; se obtuvieron resultados muy similares a los obtenidos por estos investigadores en las zonas donde se presentan puntos críticos como la onda de choque, con la salvedad que al ser diseños geométricos diferentes los perfiles de presión, temperatura y velocidad difieren un poco en su comportamiento a lo largo del separador.

Finalmente, a modo de conclusión general y de acuerdo con los resultados obtenidos, en una etapa conceptual, la implementación de la tecnología de separación supersónica para el tratamiento de gas natural es factible y su uso puede llevar a reducir los costos operativos en comparación al proceso de tratamiento convencional de gas natural.

9. Recomendaciones

Este trabajo se realizó con varios modelos simplificados debido a la complejidad del costo computacional que modelos más robustos habrían supuesto para el tiempo de cómputo y de la obtención de resultados, por lo que los datos que aquí se presentan representan una base desde la cual partir para realizar estudios con modelos matemáticos más complejos que permitan verificar

los resultados obtenidos para la tecnología de separación supersónica aplicada a la remoción de los compuestos pesados del gas natural a través de estas simulaciones.

Se recomienda para una etapa posterior a otros estudios el desarrollo de un modelo a escala con el fin de realizar pruebas que permitan retroalimentar el modelo propuesto y sacar conclusiones con una base de datos experimentales tomados directamente de los campos de gas natural colombianos.

Finalmente se recomienda realizar un estudio técnico-económico de la viabilidad de la implementación de la tecnología de separación supersónica teniendo en cuenta los resultados obtenidos en este trabajo y en estudios posteriores con el fin de corroborar si el uso de esta tecnología permite el aprovechamiento de los campos pequeños de gas natural que actualmente son inviables por los altos costos del proceso de tratamiento convencional.

Referencias

- Alfyorov, V., Dmitriev, L., Feygin, V., Imayev, S., & Lacey, J. R. (2005). Supersonic Nozzle Efficiently Separates Natural Gas Components. *Oil & Gas Journal*, 103, 53-58. <https://www.ogj.com/articles/print/volume-103/issue-20/processing/supersonic-nozzle-efficiently-separates-natural-gas-components.html>
- Altam, R. A., Lemma, T. A., & Jufar, S. R. (2017). Trends in Supersonic Separator design development. *MATEC Web of Conferences*, 131, 03006. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713103006>
- ANSYS Inc. (2009). *ANSYS FLUENT - User's Guide* (p. 2070). ANSYS, Inc.
- ANSYS Inc. (2013). *ANSYS Fluent Theory Guide*. 15317, 561-562. [https://doi.org/10.1016/0140-3664\(87\)90311-2](https://doi.org/10.1016/0140-3664(87)90311-2)
- Ardila Marín, J., Hincapié Zuluaga, D., & Sierra del Rio, J. (2016). Independencia de Malla en Tubos Torsionados para Intercambio de Calor: Caso de Estudio. *Revista de la Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia Sede Medellin*, 5(1), 124-140. <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v5n1.54231>
- Arina, R. (2004). Numerical simulation of near-critical fluids. *Applied Numerical Mathematics*, 51(4), 409-426. <https://doi.org/10.1016/j.apnum.2004.06.002>
- Bao, L., Liu, Z., Liu, H., Jiang, W., Zhang, M., & Zhang, J. (2010). Phase equilibrium calculation of multi-component gas separation of supersonic separator. *Science China Technological Sciences*, 53(2), 435-443. <https://doi.org/10.1007/s11431-009-0326-7>
- Becerra Fernández, M., & Rodríguez Yee, R. (2017). Selection of Alternatives for the Natural Gas Supply in Colombia Using the Analytic Hierarchy Process. *Revista Ingeniería*, 22(2), 190-210. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/reving/article/view/10922/12575>

- Betting, M., Van Holten, T., & Prast, B. (2008). *US7357825B2* (Patent N.º US7357825B2).
- Bian, J., Jiang, W., Hou, D., Liu, Y., & Yang, J. (2018). Condensation characteristics of CH₄ - CO₂ mixture gas in a supersonic nozzle. *Powder Technology*, 329, 1-11.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.01.042>
- Borissov, A., Mirzoev, G., & Shtern, V. (2014). *US8790455B2*.
<https://patents.google.com/patent/US8790455B2/en>
- Capote, J. A., Alvear, D., & Abreu, O. V. (2008). Influencia del modelo de turbulencia y del refinamiento de la discretización espacial en la exactitud de las simulaciones computacionales de incendios. *Rev. Int. Mét. Num. Cál. Dis. Ing*, 24(3), 227-245.
- CREG. (2007). *Resolución 054 de 2007*. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía.
<http://apollo.creg.gov.co/Publicac.nsf/Indice01/Resoluci%C3%B3n-2007-CREG054-2007>
- Cuchimaque Lugo, J. E. (2006). *Evaluación del efecto Joule-Thompson y el Hold Up de líquido en sistemas de transporte de gas natural* [Tesis de Pregrado]. Universidad Industrial de Santander.
- Demirel, Y. (2012). *Energy: Production, conversion, storage, conservation, and coupling*. Springer.
- Dennis, S. C. R., Singh, S. N., & Ingham, D. B. (1980). The steady flow due to a rotating sphere at low and moderate Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 101(2), 257-279.
<https://doi.org/10.1017/S0022112080001656>
- Gamboa, R., & Badillo, J. (2012). Separadores Gas—Líquido Supersónicos. Simulación CFD, aplicación en la Industria del Gas Natural en Colombia. *Revista MET&FLU*, 6, 34-43.
- Garrett, R. L. (1971). *US3559373* (Patent N.º US3559373).
- Guevara Luna, M. (2015). *Diseño de un equipo de recuperación de líquidos de gas natural*

- empleando CFD* [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional de Colombia.
- Guevara Luna, M. & Belalcázar Cerón, L. C. (2017). NGL supersonic separator: Modeling, improvement, and validation and adjustment of k-epsilon RNG modified for swirl flow turbulence model. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 82, 82-93. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n82a11>
- Haghighi, M., Hawboldt, K. A., & Abedinzadegan Abdi, M. (2015). Supersonic gas separators: Review of latest developments. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 27, 109-121. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.08.049>
- Hou, D., Jiang, W., Zhao, W., Bian, J., Liu, Y., & Lai, X. (2018). Effect of linetype of convergent section on supersonic condensation characteristics of CH₄-CO₂ mixture gas in Laval nozzle. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 133, 128-136. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.09.016>
- Keisuke, S. (1990). *JPH0217921A* (Patent N.º JPH0217921A). <https://patents.google.com/patent/JPH0217921A/en>
- Liu, H., Liu, Z., Feng, Y., Gu, K., & Yan, T. (2005). Characteristics of a supersonic swirling dehydration system of natural gas. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 13(1), 9-12.
- Machado, P. B., Monteiro, J. G. M., Medeiros, J. L., Epsom, H. D., & Araujo, O. Q. F. (2012). Supersonic separation in onshore natural gas dew point plant. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 6, 43-49. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2012.03.001>
- Okimoto, F. T., & Brouwer, J. (2002). Supersonic Gas Conditioning. *World Oil*, 223(8), 89-91.
- Prast, B., Lammers, B., & Betting, M. (2006). Cfd for Supersonic Gas Processing. *5th International Conference on CFD in the Process Industries, December*, 1-6.
- Revista Dinero. (2016). Cinco razones por las que a Colombia no le alcanzó el gas para El Niño.

- Revista Dinero*. <https://www.dinero.com/pais/articulo/cinco-razones-por-las-que-a-colombia-no-le-alcanzo-el-gas-para-el-nino/222323>
- Russell, F. G., Adler, S., Albaugh, L. R., & Aldana, G. J. (2004). *GPSA Engineering Data Book. Gas Processors Suppliers Association: Vols. I & II* (Twelfth). [http://ghajar.ceat.okstate.edu/pub_pdfs/Ghajar_Engineering Data Book III_Chapter 5.pdf](http://ghajar.ceat.okstate.edu/pub_pdfs/Ghajar_Engineering_Data_Book_III_Chapter_5.pdf)
- Twister BV. (2017). *Twister Supersonic Separator*. <https://www.twisterbv.com/twister-supersonic/>
- Van Holten. (1992). *EP0496128A1* (Patent N.º EP0496128A1). <https://patents.google.com/patent/EP0496128A1/en>
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method* (2nd ed). Pearson Education Ltd.
- Wang, Y., & Hu, D. (2018). Structure improvements and numerical simulation of supersonic separators with diversion cone for separation and purification. *RSC Advance*, 8, 10228-10236. <https://doi.org/10.1039/C7RA13198D>
- Wen, C., Cao, X., & Yang, Y. (2011). Swirling flow of natural gas in supersonic separators. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 50(7), 644-649. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2011.03.008>
- Wen, C., Cao, X., & Yang, Y. (2013). *CN102167988B* (Patent N.º CN102167988B). <https://patents.google.com/patent/CN102167988B/en>
- Wen, C., Cao, X., Yang, Y., & Li, W. (2012). An unconventional supersonic liquefied technology for natural gas. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, 30(1), 651-660.
- Wen, C., Cao, X., Yang, Y., & Zhang, J. (2012). Evaluation of natural gas dehydration in

- supersonic swirling separators applying the Discrete Particle Method. *Advanced Powder Technology*, 23(2), 228-233. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2011.02.012>
- Yang, Y., Wen, C., Wang, S., & Feng, Y. (2014). Numerical simulation of real gas flows in natural gas supersonic separation processing. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 21, 829-836. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2014.10.010>
- Yeoh, G. H., & Tu, J. (2010). *Computational techniques for multi-phase flows: Basics and applications* (1. ed). Elsevier, Butterworth-Heinemann.
- Zhang, Y. P., Wang, S. Z., Jing, Z. F., Lv, M. M., & Luo, X. R. (2014). Design and Simulation of Supersonic Swirling Separator. *Advanced Materials Research*, 1008-1009, 1148-1153. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1008-1009.1148>

Apéndices

Apéndice A: Propiedades del gas natural colombiano utilizado en la simulación

Para ahorrar en costo computacional se creó un nuevo fluido con las propiedades de la mezcla de todos los componentes presentes en el gas natural con el que se realizaron las simulaciones. Para la creación del gas natural en ANSYS fue necesario introducir al software una ecuación que permitiera calcular la capacidad calorífica, la conductividad térmica y la viscosidad del gas natural. Las Figuras A1, A2 y A3 presentan cada una de estas curvas respectivamente.

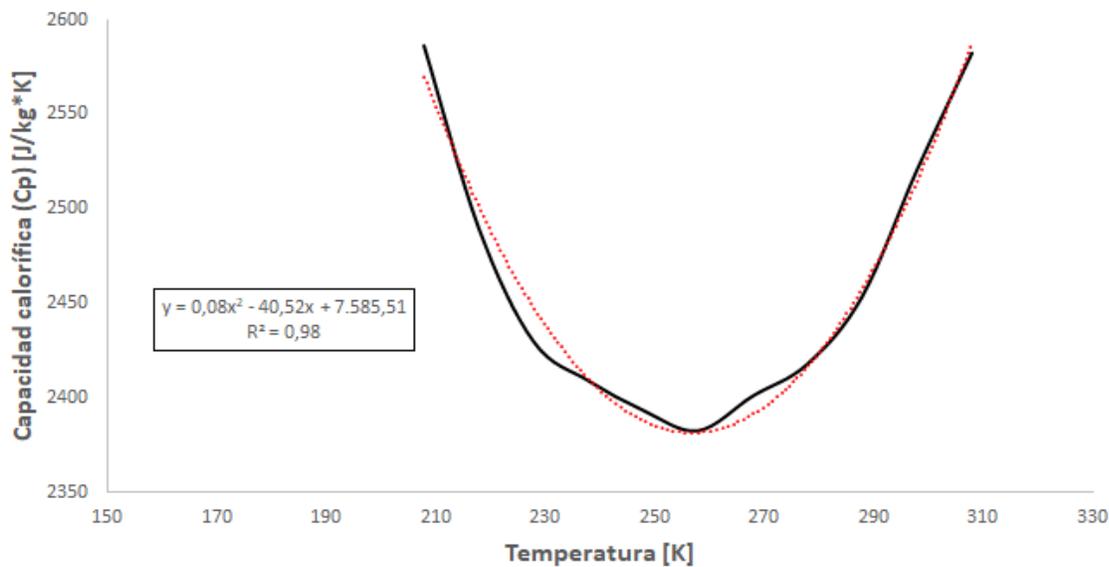


Figura A 1. Capacidad calorífica Vs. Temperatura para el gas natural colombiano usado en la simulación.

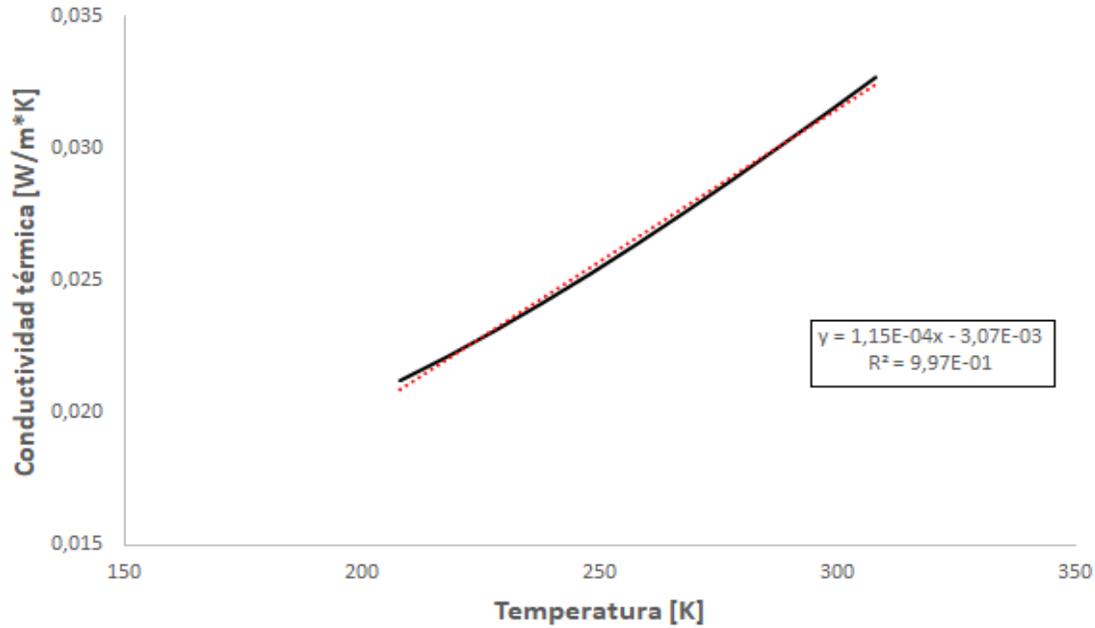


Figura A 2. Conductividad térmica Vs. Temperatura para el gas natural colombiano usado en la simulación.

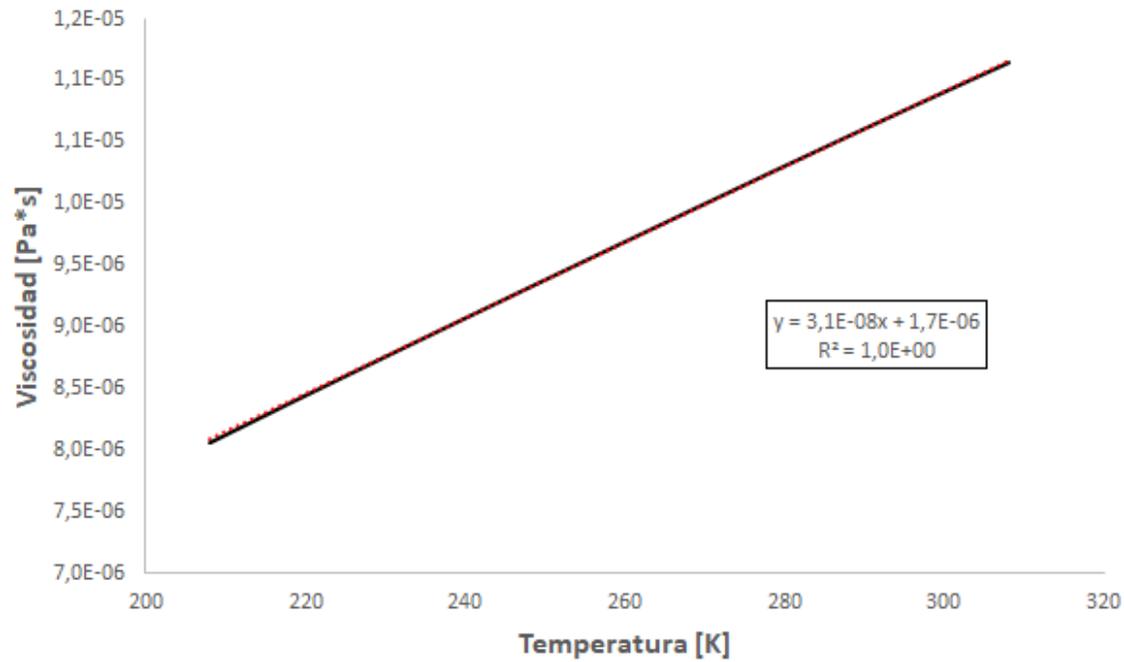


Figura A 3. Viscosidad Vs. Temperatura para el gas natural usado en la simulación.

Con estos datos fue creado el gas natural con el cual se realizó la simulación a condiciones de presión y temperaturas dadas anteriormente para un campo colombiano.