

**EVALUACIÓN DE LOS PROCESOS CINÉTICOS Y TERMODINÁMICOS DEL
GAS EN UN SEPARADOR TWISTER**

ALEXIS ALCIDES ARIZA ORTIZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2016

**EVALUACIÓN DE LOS PROCESOS CINÉTICOS Y TERMODINÁMICOS DEL
GAS EN UN SEPARADOR TWISTER**

ALEXIS ALCIDES ARIZA ORTIZ

**Proyecto de grado presentado como requisito parcial para obtener el título
de Ingeniero de Petróleos**

Director:

NICOLAS SANTOS SANTOS

Msc. en Ingeniería de Hidrocarburos

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2016

DEDICATORIA

Este esfuerzo se lo dedico la persona que siempre me ha apoyado, me ha dado la sabiduría para seguir adelante, me ha enseñado vivir la vida y me ha brindado su amor incondicional a mi madre, Myriam Ortiz.

Quiero decirselo a mi familia, a mi padre, mis hermanos y a mis abuelos,

A mis docentes y mi director de proyecto, que me han brindado una base en el conocimiento y el saber,

Se lo dedico también a todas aquellas personas que me han acompañado y sin ningún interés han hecho un esfuerzo por mí, a usted Fugenia Duran, gracias por ser tan especial y colaboradora.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. SEPARADOR SUPERSÓNICO TWISTER	17
1.1 ETAPAS EN EL FUNCIONAMIENTO DEL TWISTER	18
1.2 VENTAJAS Y PUNTOS A FAVOR	22
2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO Y FUNCIONAMIENTO DEL SEPARADOR SUPERSÓNICO TWISTER	24
2.1 MÓDULO DE COMPRESIBILIDAD DEL GAS.	24
2.2. PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA:	25
2.3 EXPANSIÓN ISENTRÓPICA DE UN FLUJO DE GAS A TRAVÉS DE TOBERAS Y DIFUSORES.	26
2.3.1 Segunda ley de la termodinámica	26
2.3.2 Entropía	27
2.3.3. Proceso Isentrópico	28
2.3.4. Relación presión temperatura en un proceso expansión adiabática reversible	29
2.3.5. Relación Densidad temperatura un proceso expansión adiabática reversible.	29
2.3.6. Ecuación de balance de energía en toberas y difusores para expansión y compresión adiabática	30
2.3.7 Coeficiente adiabático	31
2.4 ENTALPIA DEL GAS	32

2.5 NUMERO MACH	34
2.6 VELOCIDAD DE SONIDO	35
2.7 COMPORTAMIENTO DEL GAS AL FLUIR POR UNA TOBERA LAVAL.	37
2.8 DESCRIPCIÓN DE UNA ONDA DE CHOQUE NORMAL:	40
3. GEOMETRÍA Y CONFIGURACIÓN DEL SEPARADOR SUPERSÓNICO TWISTER.	43
4. DESCRIPCIÓN DE LA SEPARACIÓN DE FASES	48
4.1 EQUILIBRIO DE FASE	48
4.2 CONTENIDO DE VAPOR DE AGUA EN EL GAS NATURAL WC	49
4.3 ESPECIFICACIONES DE CALIDAD DEL GAS	52
4.4. DESCRIPCIÓN DE SEPARACIÓN DE FASES	53
5. DIAGRAMAS DE FASES APLICADAS AL TWISTER	56
5.1 DIAGRAMA P-H PARA SEPARADOR SUPERSÓNICO TWISTER.	56
5.2 EL DIAGRAMA PRESIÓN-ENTROPÍA P-S APLICADO AL TWISTER.	58
6. MODELAMIENTO MATEMÁTICO Y FÍSICO	59
6.1 CONSIDERACIONES, LÍMITES Y CONDICIONES.	59
6.1.1. Condiciones de diseño	59
6.2. ECUACIONES Y MODELOS MATEMÁTICOS	60
6.2.1 Ecuación de estado Peng Robinson PR.	61
6.2.2. Aproximaciones de los cambios de propiedades	62
6.2.2.1 Regresión exponencial presión temperatura P vs T	63
6.2.2.2 Regresión exponencial densidad temperatura p vs T	63

6.2.2.3 Regresión polinomial grado 3 entalpia temperatura H vs T	63
6.2.2.4 Regresión polinomial grado 3 coeficiente de compresibilidad temperatura Z vs T	63
6.2.2.5 Regresión polinomial grado 3 coeficiente adiabático temperatura Y vs T	64
6.2.3 Ecuación de continuidad y conservación de la masa.	64
6.2.4 Concepto de Radio equivalente.	65
6.3 DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CÁLCULO	66
7. ANÁLISIS Y RESULTADOS	67
7.1 EXPANSIÓN ADIABÁTICA DEL GAS	68
7.2 COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS DE FLUJO EN EL TWISTER.	71
7.3. EFECTOS Y CAMBIOS DE LOS PARÁMETROS DE FLUJO AL VARIAR LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN	75
7.3.1 Conceptos Preliminares	75
7.3.2 Cambios en la presión exterior del diseño.	78
7.3.3 Cambios de presión del gas en la boquilla de entrada	80
7.3.4. Cambios en temperatura del gas en la boquilla de entrada.	83
7.3.4 Cambios de flujo de gas en el proceso.	85
8. COSTO DE UNA PANTA USANDO LA TECNOLOGÍA TWISTER.	87
9. CONCLUSIONES	89
10. RECOMENDACIONES	91
BIBLIOGRAFÍA	92

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Desarrollo y evolución del separador supersónico Twister.	17
Figura 2. CFD for supersonic gas processing	18
Figura 3. Etapas en el funcionamiento del twister	18
Figura 4. Tasa de nucleacion dentro del Twsiter.	20
Figura 5. Esquema general twister anular.	21
Figura 6. Diagrama PH de una sustancia	32
Figura 7. Cambios de presión y velocidad al variar el área que atraviesa un flujo de gas.	39
Figura 8. Disminución de la presión con respecto al avance del flujo por una tobera.	40
Figura 9. Régimen de flujo en términos del número Mach y la presión	44
Figura 10. Geometría y componentes principales del interior del separador supersónico	45
Figura 11. Diagrama de fase PT	48
Figura 12. Contenido de vapor de agua en gas natural	51
Figura 13. Twister Swirl.	53
Figura 14. Separación de fases en la tobera	54
Figura 15. Perfil de la tasa de nucleación en el twister.	55
Figura 16. Diagrama P-H para el proceso de deshidratación y recobro de GLP con supersónico twister	57
Figura 17. Diagrama P-S para el proceso de deshidratación y recobro de GLP supersónico twister.	58
Figura 18. Radio Equivalente.	65
Figura 19. Expansión adiabática del gas natural caso base.	69

Figura 20. Caída de Presión a lo largo de separador supersónico Twister obtenida del procedimiento para 3lb h ₂ o/MMscf.	71
Figura 21. Esquema del twister y representación de los procesos dentro de este para 3lb h ₂ o/MMscf	72
Figura 22. Geometría y propiedades del gas al fluir dentro del Twister obtenida del procedimiento para 3lb/MMSCF.	73
Figura 23. Velocidad y velocidad del sonido del gas natural y numero Mach obtenida del procedimiento.	74
Figura 24. Diagrama P-H obtenida de Twister procedimiento.	75
Figura 25. Condición Ma=1 al variar las los parámetros de flujo.	76
Figura 26. Diseño del Twister para obtener un contenido de 6lb/MMscf.	78
Figura 27. Presión exterior del diseño.	79
Figura 28. Cambios en la presión en la boquilla de entrada del twister	81
Figura 29. Contenido de agua en el gas vs cambios de presión en la boquilla de entrada.	82
Figura 30. Cambios en la temperatura en la boquilla de entrada del Twister.	83
Figura 31. Contenido de agua en el gas vs cambios de temperatura en la boquilla de entrada.	84
Figura 32. Cambios en flujo volumétrico del gas.	85
Figura 33. Contenido de agua en el gas vs cambios del flujo de gas.	86
Figura 34. Esquema de la planta para control de punto de rocío y obtención GNL usando el separador supersónico Twister.	87

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Especificaciones de calidad del gas. RUT.	52
Tabla 2. Composición gas natural	67
Tabla 3. Costo de una planta para control de punto de rocío y obtención GNL usando el separador supersónico Twister.	87

NOMENCLATURA

Letra	Variable	unidad
<i>P</i>	Presión	Kpa
<i>T</i>	Temperatura	K
<i>p</i>	Densidad	Kg/m^3
<i>v</i>	Volumen	m^3
<i>y</i>	Coeficiente adiabático	
<i>z</i>	Factor de compresibilidad	
<i>C</i>	Velocidad del Sonido	m/s
<i>V</i>	Velocidad	m/s
<i>Ma</i>	Numero Mach	
<i>U</i>	Energía interna	kj/kg
<i>H</i>	Entalpia	Kj/Kg
<i>S</i>	Entropía	KJ/K
<i>Cp</i>	Capacidad calorífica presión constante	KJ/KgK
<i>A</i>	Área	m
ξ	Relación de Presiones en la onda de choque	
<i>Wc</i>	Contenido de agua en el gas	$Lb H2O/MMscf$
<i>GLP</i>	Gas natural licuado del petróleo	
<i>L</i>	Longitud	m
<i>A₀</i>	Área inicial	m
<i>R₀</i>	Radio Inicial	mm
<i>A_c</i>	Área critica	m
<i>A_{oc}</i>	Área onda de choque	m
<i>A_s</i>	Área salida	m
<i>m</i>	Flujo másico	Kg/s
<i>R_{eq}</i>	Radio equivalente	mm
<i>R_{eqc}</i>	Req Critico	mm
<i>R_{eqOC}</i>	Req Onda de choque	mm
<i>Q</i>	Flujo Volumétrico	$MMscfD$
<i>Ec</i>	Ecuaciones RANKINE-HUGONIOT	
<i>RH</i>		

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN DE LOS PROCESOS CINÉTICOS Y TERMODINÁMICOS DEL GAS EN UN SEPARADOR TWISTER*

AUTORES: ARIZA ORTIZ ALEXIS
SANTOS SANTOS NICOLAS**

PALABRAS CLAVES: Separador supersónico Twister, Deshidratación del gas natural, Extracción de (GLP), expansión isentrópica, Condensación y separación a velocidades supersónicas.

Dado que el hoy en día el gas natural es una fuente de energía con alta demanda y menos contaminante que el crudo, es de vital importancia estudiar las tecnologías diseñadas para su refinación, uno de esos equipos es el twister BV.

El separador supersónico Twister es un unidad no convencional usado para deshidratación, obtención del Gas Licuado del Petróleo (GLP) y control de punto de rocío del gas natural, este trabajo de investigación tuvo como objetivo reunir información concerniente al equipo para profundizar en su estudio.

En el primer capítulo se encuentra una introducción y una descripción de cómo funciona el separador supersónico, en los capítulos 2 y 3 se hará énfasis en las propiedades del gas al ser sometido por el proceso junto con la descripción del funcionamiento y diseño detallado de twister, el capítulo 4 una descripción del fenómeno de separación de fases en el twister, los capítulos 5 y 6 tratarán sobre las ecuaciones y planteamientos conceptuales aplicados al twister.

En el capítulo 7 puede encontrar los resultados obtenidos del procedimiento junto con el análisis de sensibilidad de las propiedades y variables más influyentes en el proceso.

El capítulo 8 es una reseña económica del costo de una planta de gas usando Twister.

* Proyecto de grado

** Facultad de ingeniería físico- químicas, escuela de ingeniería de petróleos. Director: Msc. Nicolas Santos Santos

SUMMARY

TITLE: EVALUATION THE KINETICS AND THERMODYNAMICS' PROCESSES IN A TWISTER GAS SEPARATOR*

AUTHORS: ARIZA ORTIZ ALEXIS
SANTOS SANTOS NICOLAS**

KEYWORDS: Twister supersonic gas separator, natural gas dehydration, Natural Gas Liquids extraction (NGL) or Liquefied petroleum gas (LPG), isentropic expansion, Condensation and separation at supersonic velocity.

Nowadays, the natural gas is source of energy with high demand and it pollutes less than the crude oil, it is vital to study the technologies designed for further improving of it, one of those equipment is the Twister BV.

The supersonic gas separator Twister is not a conventional equipment, it is used for dehydration, Liquefied petroleum gas (LPG) recovery and dew-point control of natural gas. This research aimed at collecting information about the Twister for deepen its study.

In the first chapter, you can find an introduction and a description of how the supersonic gas separator operates. In the second and third chapters, you can learn about the gas properties when it is used in the process along with functional description and a detailed design of a Twister apparatus. In chapter number four, there is a description about the phase separation phenomenon that happens inside the twister. Chapters number five and six are about equations and conceptual issues applied to the twister.

In the chapter number seven, you can find the results of the method with a sensitivity analysis of the most influential properties and variables of the process.

Chapter number eight is about an economic review of the cost of a gas plant using the Twister technology.

* Degree Project

** Physicochemical Engineering Faculty. Petroleum Engineering Director: M.Sc Nicolás Santos Santos.

INTRODUCCIÓN

La Disminución de las reservas de crudo de alta calidad y el aumento de la demanda de gas natural tienden a llevar a la industria energética a descubrir nuevos yacimientos de gas en zonas más remotas y poco accesibles, como las plataformas offshore, que impulsan a la industria extracción y producción de los hidrocarburos a crear nuevas tecnologías más eficaces y mucho más amigables con el medio ambiente, procurando llegar a zonas de acceso restringidos o que requieren de altos estándares de control ambiental.

En este orden de ideas, la deshidratación del gas y el recobro líquidos GLP es un proceso importante dentro de la industria de gas, dado a que estos, permiten mejorar la calidad de este, llevándolo a las condiciones de ventas establecidas por la ley, así como también, prevenir problemas como hidratos, condensación de líquidos, disminución de la energía del gas a lo largo de todo el sistema de refinamiento y transporte del mismo. El separador Twister posea la facultad de llevar a cabo los dos procesos al mismo tiempo logrando así controlar el punto de rocío de los hidrocarburos de una mezcla y extrayendo las moléculas de agua mediante el aprovechamiento del efecto de la velocidad flujo de una corriente de gas.

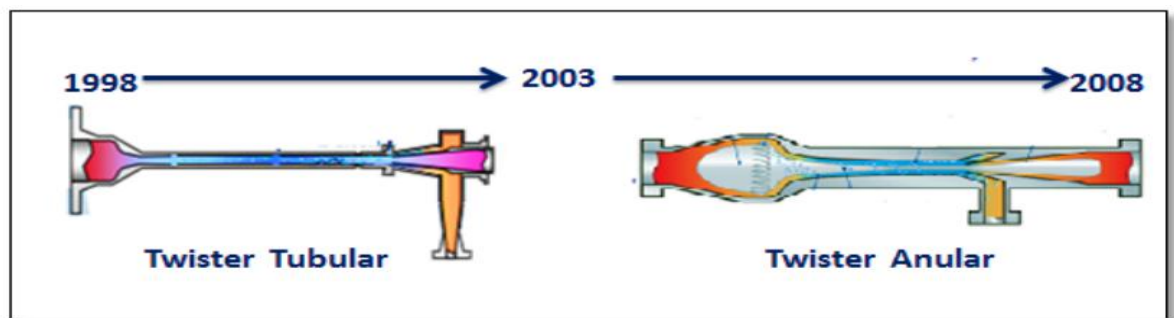
Este estudio tiene la finalidad de analizar de manera conceptual y analítica, los procesos termodinámicos y cinéticos de un gas que pasa a través del separador twister, lo que permitirá establecer hipótesis del comportamiento dinámico del fluido en cada una de las etapas del separador supersónico, esto con el fin de recolectar datos que permitan concretar respuestas acerca del comportamiento variado del gas a través del proceso. Los resultados de este proyecto permitirán

profundizar en un tema poco estudiado en la universidad, del cual ella misma podría hacer uso en sus aulas de clases enfrentándolo a procesos diferentes como deshidratación con glicoles , TurboExpander, entre otros; por otro lado, permitirá diferenciar el complejo cambio de las variables termodinámicas para así poder ser mostradas a través de un diagrama de Mollier y mediante análisis de condiciones termodinámicas y las fluctuaciones de las energías aportar desde allí los conceptos para su correcto estudio.

1. SEPARADOR SUPERSÓNICO TWISTER

El twister es una tecnología desarrollada para la industria aeroespacial por Stork NV de quien Shell adquirió toda la propiedad intelectual en 1999/2000. el cual ha pasado por una serie de modificación, el primer twister era tubular y el diseño actual es anular (figura 1).

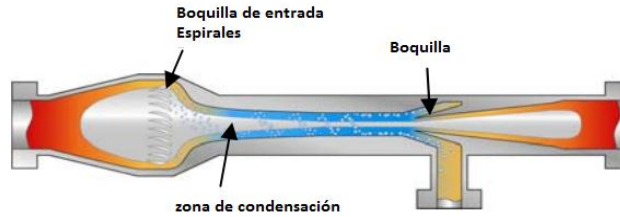
Figura 1. Desarrollo y evolución del separador supersónico Twister.



Fuente: EPSOM, H. Twister Technology Development Twister BV.: 2009.

El twister Consiste en un dispositivo de separación tubular/anular compacto (figura 1), sin partes móviles en el cual se aprovecha el proceso de expansión y compresión que sufre el gas al pasar por una tobera convergente/divergente aprovechando la condensación por expansión y la compresión por difusión del vapor de agua y los hidrocarburos pesados como otros gases, por medio de la transformación de la energía interna a energía cinética y viceversa para el proceso de compresión.

Figura 2. CFD for supersonic gas processing

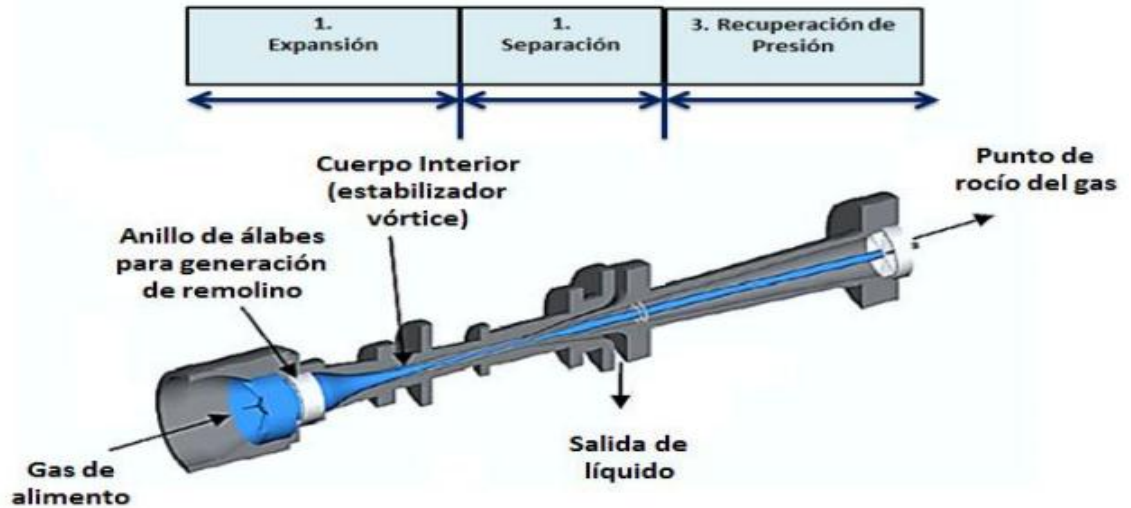


Fuente: Bart PRAST, Bart LAMMERS and Marco BETTING, Twister BV, Einsteinlaan 10, 2289 CC, Rijswijk, NETHERLANDS, December 2006.

1.1 ETAPAS EN EL FUNCIONAMIENTO DEL TWISTER

Para la descripción del funcionamiento del Twister podremos dividirlo en tres grandes etapas (figura 3):

Figura 3. Etapas en el funcionamiento del twister



Fuente: EPSOM, H. Supersonic Gas conditioning-Low Pressure Drop. OTC 17884. 2006.

Para que el proceso sea supersónico debe existir régimen de flujo en cada etapa Expansión y separación (subsónico), Garganta o Vórtice (Supersónico) y subsónico (difusor/compresión):

- ❖ Primera etapa Expansión: al fluir el gas dentro de los alabes de entrada (pequeños orificios) que al cambiar de un área mayor a una menor provocan expansión adiabática con alta eficiencia isentrópica, el gas transforma su energía interna en energía cinética en un proceso adiabático en el cual hay una disminución de temperatura y presión que provoca la condensación del vapor de agua y GLP.
- ❖ Segunda Etapa: La etapa de separación, en el cual se desvían la corriente de gas y líquidos condensados a altas velocidades para ser extraídos en diferentes compartimientos. Otro proceso que se llevan a cabo en esta etapa es la nucleación y crecimiento de gota; “La condensación de los hidrocarburos más pesados del gas que atraviesa el dispositivo Twister, se da por dos procesos físicos denominados nucleación y crecimiento de gota.

La rápida expansión del gas hace que éste alcance un estado de no equilibrio, es decir, el gas se supersatura. Este estado metaestable genera una niebla fina del tamaño de micrones (nucleación), que crece mediante la difusión y coalescencia de las gotas (crecimiento de gota). La metaestabilidad del gas en este punto, es producto de la diferencia entre el potencial químico del gas sobresaturado y el líquido a las mismas condiciones de presión y temperatura. Ya que la condensación de las gotas se genera bajo la acción de un potencial químico entre las mismas moléculas del gas y sin presencia de iones, la

nucleación es homogénea y el crecimiento de gotas se dará mientras la relación de saturación permanezca mayor a la unidad”¹

$$S = \frac{P_v}{P_r(T)} \dots\dots\dots 1.1$$

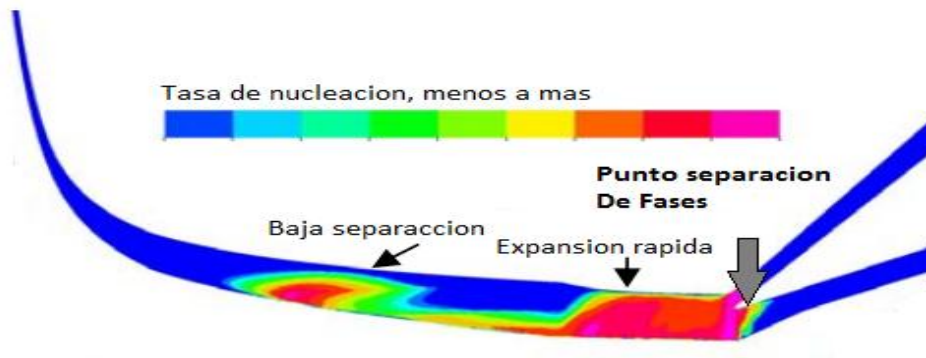
Donde:

S= Relación de saturación.

Pv= Presión parcial vapor de agua.

Pr= Presión de saturación.

Figura 4. Tasa de nucleacion dentro del Twister.



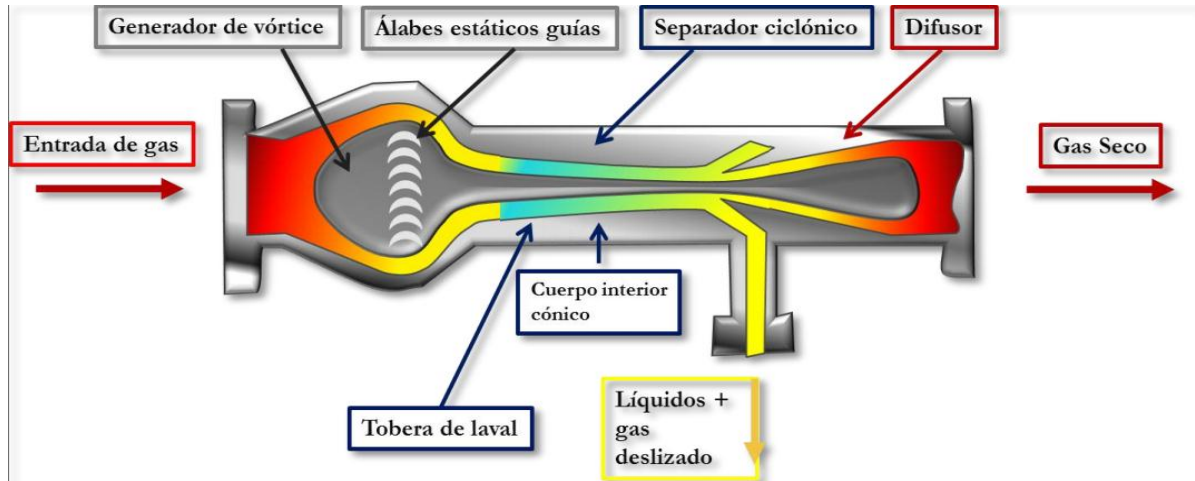
Fuente: Modificada por el autor, tomada de Bart PRAST, Bart LAMMERS and Marco BETTING, Twister BV . **“CFD FOR SUPERSONIC GAS PROCESSING”**. NETHERLANDS, Diciembre 2006.

En la figura 4. Apreciamos los segmentos donde mayor curre el aglomeramiento de los granos y como se dividen las corrientes gaseosa y liquida, gracias al efecto centrifugo y a la diferencia de densidades de las partículas.

¹ GONZALEZ Nathalia y BEJARANO Aljed, Análisis de los parámetros de flujo de una corriente de gas a través de un separador supersónico twister, Bucaramanga, 2012.

- ❖ Tercera etapa Comprensión: al contrario de la expansión sufrida en la primera etapa el twister está diseñado para que después de vórtice actué como un difusor, lo cual quiere decir que el cambio de área se hará de menos a más, provocando el efecto contrario, una recomprensión del gas adiabática ayudado de un proceso conocido como onda de choque lo cual apoya a restablecer las condiciones de temperatura presión entre otras propiedades iniciales del gas a la salida del separador.

Figura 5. Esquema general twister anular.



Fuente: EPSOM, H. How does Twister work. Twister BV. 2007.

En la Figura 5, se observan las propiedades de presión y temperatura en rangos de rojo alto, amarillo para rango medio, azul y verde para bajos, que sufre el gas a través de un separador, así como también podremos observar la dirección de los líquidos separados del gas.

1.2 VENTAJAS Y PUNTOS A FAVOR

Los principales puntos a favor del separador supersónico twister según la empresa Twister BV son:

Beneficios comerciales

- Reducciones significativas en el capital y el ahorro de costes operativos.
- Tamaño y peso reducido.
- Uso reducido de productos químicos.
- Ubicación y funcionamiento cerca de las tuberías de producción.
- Bajos costes por ciclo de vida.

Operacionales

- Deshidratación simultánea con control de punto de rocío y recuperación de GLP.
- Eficiencia superior al 90%

Ambientales

- Sistema cerrado.
- No hay emisiones químicas.
- Sin partes móviles.
- Poco mantenimiento.
- Reducción del riesgo de accidente.²

² TWISTERBV About [en línea] disponible en: <http://twisterbv.com/about/>

P. Schinkelshoek and H. Epsom, identifican los siguientes beneficios de su uso:

- Reducción de la caída de presión desde 33% hasta 25%
- eficiencia de separación líquido sobre 90%
- C5 + eliminación
- Recuperación C3 y CO₂
- recuperación de agua según lo predicho por los modelos CFD
- El rendimiento de los alabes no se ve afectada por arrastre de líquido desde el separador de entrada.³

³ Supersonic Gas Conditioning Low Pressure Drop TWISTER™ for NGL Recovery, P. Schinkelshoek and H. Epsom, Twister B.V. Año 2006

2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO Y FUNCIONAMIENTO DEL SEPARADOR SUPERSÓNICO TWISTER

2.1 MÓDULO DE COMPRESIBILIDAD DEL GAS.

El Twister es un equipo basado en los fenómenos que le ocurren a un gas cuando fluye a través toberas y difusores, es decir trabaja bajo los principios de transformación de energía interna a cinética y viceversa.

Una tobera es un dispositivo que incrementa la velocidad de un fluido a expensas de la presión. Un difusor es un dispositivo que incrementa la presión de un fluido al desacelerarlo. Es decir, las toberas y los difusores llevan a cabo tareas opuestas. El área de la sección transversal de una tobera disminuye en la dirección de flujo para flujos subsónicos y aumenta para los supersónicos. Lo contrario es cierto para los difusores.

Un gas que fluye a través de una tobera experimenta una disminución del volumen (AV) al aumentar la presión (AP) según el módulo de compresibilidad:

$$K = -v \frac{dP}{dV} \dots\dots\dots 2.1.1$$

En términos de densidad:

$$Ks = \rho \frac{d\rho}{dP} \dots\dots\dots 2.1.2$$

Un fluido compresible tiene módulo de compresibilidad bajo (gases) además según la literatura las toberas y difusores tiene alta eficiencia isentrópica (> 90%),

debido a esto, la expansión o compresión de los gases se aproxima a un proceso adiabático reversible (isentrópico); en la cual la energía interna del gas se transforma en energía cinética y viceversa; experimentando así el fluidos cambios en la presión y temperatura.

2.2. PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA:

Según la primera la ley de la termodinámica la ecuación de la conservación de energía es:

$$U_1 + (PV)_1 + \frac{1}{2}mV_1^2 + gmZ_1 = U_2 + (PV)_2 + \frac{1}{2}mV_2^2 + gmZ_2 - Q - W \dots\dots\dots 2.2.1$$

Considerando que: el fluido fluye, se trata de un proceso adiabático (Q=0) reversible (isentrópico), no hay una maquina efectuando un trabajo y despreciando la fricción (W=0), además, los cambios en la energía potencial son despreciables $mg(z_1 - z_2) \approx 0$, la ecuación general que describe este proceso queda como:

$$U_1 + (Pv)_1 + \frac{1}{2}mV_1^2 = U_2 + (Pv)_2 + \frac{1}{2}mV_2^2 \dots\dots\dots 2.2.2$$

Donde:

1, 2 corresponde a diferentes estados.

U_i : La Energía interna

V: Velocidad

P: Presión

v: Volumen

2.3 EXPANSIÓN ISENTRÓPICA DE UN FLUJO DE GAS A TRAVÉS DE TOBERAS Y DIFUSORES.

Dado a que el flujo de gas atraviesa la toberas y difusores al interior de Twister a gran velocidad, la transferencia de calor hacia los materiales del equipo pueden considerarse despreciables ($-Q \approx 0$) es por eso que el Twister cuenta con una alta eficiencia adiabática o isentrópica.

Para hablar de isentrópica es necesario primero definir una propiedad termodinámica llamada Entropía que nace gracias a la segunda ley de termodinámica.

2.3.1 Segunda ley de la termodinámica. Con base en el enunciado de Kelvin-Planck de la segunda ley, la cual establece que ningún sistema puede producir una cantidad neta de trabajo mientras opera en un ciclo e intercambia calor con un solo depósito de energía térmica y de la cual nace la desigualdad de Clausius que establece que:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \dots\dots\dots 2.3.1$$

Esta desigualdad es válida durante todos los ciclos, tanto reversibles como irreversibles. El símbolo (símbolo de integral con un círculo en medio) se usa para indicar que la integración será realizada durante el ciclo entero. Cualquier transferencia de calor hacia o desde un sistema consiste en cantidades diferenciales de transferencia de calor. Entonces la integral cíclica de dQ/T puede considerarse como la suma de todas estas cantidades diferenciales de transferencia de calor dividida entre la temperatura en la frontera.

2.3.2 Entropía La entropía puede verse como una medida de *desorden molecular*, o *aleatoriedad molecular*. Cuando un sistema se vuelve más desordenado, las posiciones de las moléculas son menos predecibles y la entropía aumenta, de ahí que no sorprenda que la entropía de una sustancia sea más baja en la fase sólida y más alta en la gaseosa. La entropía es una medida de desorden molecular, y el desorden molecular de un sistema aislado aumenta siempre que experimenta un proceso.

Es decir una sustancia al ser sometido a un proceso libera parte de su energía hacia el medio provocando irreversibilidades y según la cual se establece que un proceso no puede ser 100% eficiente.

La entropía está definida como:

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad \left(\frac{kJ}{K}\right) \dots\dots\dots 2.3.2$$

La entropía es una propiedad extensiva de un sistema y a la vez es llamada entropía total, mientras que la entropía por unidad de masa s es una propiedad intensiva y tiene la unidad $kJ/kg \cdot K$. Generalmente, el término entropía es usado para referirse a ambas: a la total y a la de por unidad de masa, ya que el contexto normalmente esclarece de cuál se trata.

A la luz de las anteriores exposiciones, se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Los procesos sólo pueden ocurrir en una cierta dirección, no en cualquiera. Un proceso debe proceder en la dirección que obedece al principio de incremento de entropía, es decir. Un proceso que viola este principio es imposible. Este

principio obliga a menudo a las reacciones químicas a detenerse antes de completarse.

2. La entropía es una propiedad que no se conserva, por lo tanto no existe algo como el principio de conservación de la entropía. Ésta se conserva sólo durante el proceso reversible idealizado y se incrementa durante todos los procesos reales.
3. El desempeño de los sistemas de ingeniería es degradado por la presencia de irreversibilidades; y la generación de entropía es una medida de las magnitudes de irreversibilidades presentes durante ese proceso. A mayor magnitud de irreversibilidades, mayor generación de entropía. Por consiguiente, la generación de entropía puede usarse como una medida cuantitativa de irreversibilidades asociadas al proceso, y para establecer el criterio a emplearse en el diseño de dispositivos.

2.3.3. Proceso Isentrópico Antes se mencionó que la entropía de una masa fija puede cambiarse por 1) La transferencia de calor y 2) Las irreversibilidades; entonces, la entropía de una masa fija no cambia durante un proceso que es *internamente reversible* y *adiabático*. Un proceso en el que la entropía se mantiene constante es un **proceso isentrópico**, el cual se caracteriza por:

$$\Delta s = 0 \text{ o } S_1 = S_2 \dots\dots\dots 2.3.3$$

Es decir, una sustancia tendrá el mismo valor de entropía tanto al final del proceso como al inicio si el proceso se lleva a cabo de una manera isentrópica.

Muchos sistemas o dispositivos de ingeniería como bombas, turbinas, toberas y difusores son esencialmente adiabáticos en su funcionamiento, y tienen mejor

desempeño cuando se minimizan las irreversibilidades, como la fricción asociada al proceso. Un proceso isentrópico puede servir como un modelo apropiado para los procesos reales, además de permitirnos definir las eficiencias para procesos al comparar el desempeño real de estos dispositivos con el desempeño bajo condiciones idealizadas. Es importante reconocer que un proceso adiabático reversible necesariamente es isentrópico ($s_2 = s_1$). Pero un proceso isentrópico no es necesariamente un proceso adiabático reversible.⁴

2.3.4. Relación presión temperatura en un proceso expansión adiabática reversible. En un proceso adiabático se cumple que:

$$P * v^{\gamma} = cte = C \dots\dots\dots 2.3.4$$

Donde:

P: Presión.

V: volumen específico.

γ : coeficiente adiabático.

Aplicando la ley la ecuación de estado ideal $PV = nRT$

$$P_1 * v_1^{\gamma} = P_2 * v_2^{\gamma}$$

$$P_2 = P_1 \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \dots\dots\dots 2.3.4$$

2.3.5. Relación Densidad temperatura un proceso expansión adiabática reversible. En un proceso adiabático se cumple que

$$P * v^{\gamma} = cte = C$$

⁴ CENGEL Yunes A, BOLES Michael A, Termodinámica, séptima edición, MC Graw Hill, 2011.

Y aplicando $p = \frac{1}{v}$

Entonces

$$p_2 = p_1 \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \dots\dots\dots 2.3.5$$

2.3.6. Ecuación de balance de energía en toberas y difusores para expansión y compresión adiabática Dado que en un proceso adiabático se cumple que:

$$P * v^\gamma = cte = C \dots\dots\dots 2.3.6.1$$

$$h = u + Pv \quad (\text{Kj/Kg}) \dots\dots\dots 2.3.6.2$$

Donde:

H: Entalpia

U: Energía interna

Sustituyendo en la ecuación (2.3.6.1) en (2.3.6.2) Tenemos que:

$$h_1 + \frac{1}{2}V_1^2 = h_2 + \frac{1}{2}V_2^2 \dots\dots\dots 2.3.7$$

Como $(Pv^\gamma)_1 = (Pv^\gamma)_2$

Resolvemos que:

$$h_1 + \frac{1}{2}V_1^2 = h_2 + \frac{1}{2}V_2^2 = h_0 \dots\dots\dots 2.3.8$$

Ecuación general de la conservación de energía en toberas y difusores en un proceso adiabático reversible (isentrópico)

2.3.7 Coeficiente adiabático El coeficiente adiabático es la relación que existe entre los gradientes de energía interna del gas y la entalpia y esta definido por:

$$y_i = \frac{\Delta H}{\Delta U} = \frac{C_{p_i} T_i}{C_{v_i} T_i} = \frac{C_{p_i}}{C_{v_i}} \dots\dots\dots 2.3.9$$

Donde:

y: Coeficiente adiabático.

ΔH : cambio en la entalpia.

ΔU : Cambios en la energía interna.

C_{p_i} : Capacidad calorífica a presión constante.

C_{v_i} : Capacidad calorífica a Temperatura constante.

Entonces también queda definido como la relación de la capacidad calorífica a presión constante C_p y a volumen constante C_v .

Esta relación se calcula teniendo en cuenta la pendiente de la curva de una transformación isoterma y adiabática; dado que el proceso en el twister es isotrópico el coeficiente adiabático será particular para cada gas a tratar y de sus condiciones.

2.4 ENTALPIA DEL GAS

$$H_i = Cp_i * T_i \dots\dots\dots 2.4.1$$

Donde:

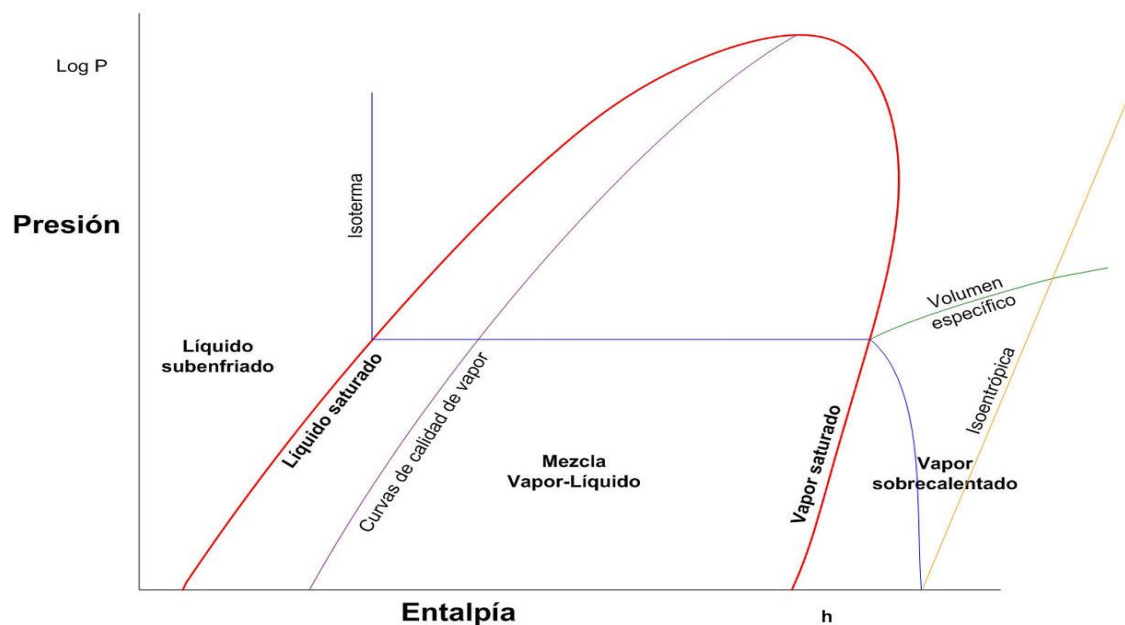
H: Entalpia

Cp: Capacidad calorífica

T: Temperatura

Dado que en el Twister ocurre una transformación de la energía entalpia a energía cinética es importante representar estos cambios en un diagrama de Mollier o diagrama PH, en el que se representa gráficamente en un plano la presión y entalpía de los posibles estados de un compuesto químico. Figura 6.

Figura 6. Diagrama PH de una sustancia



Fuente: WIKIPEDIA Diagrama PH [en línea] disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama_Ph

Básicamente el diagrama está compuesto por dos ejes principales y tres zonas delimitadas por una curva de saturación.

- En el eje de las ordenadas se registra el valor de Presión (kpa).
- En el eje de las abscisas se registra el valor de entalpía en unidad de masa en [kJ/kg]
- Una curva de saturación.

A su vez se definen seis tipos de trazas a través de las cuales se describen los ciclos de refrigeración y los estados de agregación de la materia.

- Isobaras: Líneas de presión, presentadas como rectas paralelas con igual valor de presión
- Isoentálpicas: Rectas paralelas que coinciden iguales valores de entalpía en masa. Estas son perpendiculares al eje de las abscisas.
- Isotermas: son representadas en la zona de líquido subenfriado como paralelas a la ordenada, dentro de la campana de mezclas esta son paralelas a la abscisa, por otra parte, en la zona de vapor sobrecalentado describen una descendiente en forma de curva. Estos trazados “paralelos” entre si concuerdan los valores de igual temperatura en el sistema y las tablas de PH (representadas con el color azul)
- Isocoras: son representadas con unas curvas que concuerdan con los puntos con el mismo volumen específico, a su vez, son paralelas entre sí en relación a distintos valores. En el Sistema se expresa como [m³/kg]. Se desarrollan en la parte izquierda de la zona de mezcla de líquido y vapor, extendiéndose hacia la

derecha hasta coincidir con la de vapor de agua sobrecalentado hasta finalizar el diagrama (representada con el color verde)

- Isentrópica: representadas por las curvas que coinciden con los valores de igual entropía en el sistema. Dentro del sistema se miden en [kJ/kg K] ó [kJ/kg°C]. Trazos paralelos entre si representadas en la gráfica con color amarillo
- Curvas de calidad de vapor estas curvas indican el porcentaje de masa de vapor contenido en la mezcla liquido-vapor. Se extienden únicamente dentro de la campana de mezcla, coincidiendo en su extremo superior, a diferencia de su extremo inferior donde se encuentra relativamente equidistante de la adyacente. Sus valores son nominados en término del 0,1 a 0,9 representado con el color violeta.

2.5 NUMERO MACH

La relación que existe entre la velocidad del gas y sus propiedades viene por la ecuación del número mach (Ma):

$$Ma = \frac{V_i}{C_{i(T,P)}} \dots\dots\dots 2.5.1$$

Donde

Ma: Numero Mach.

V: velocidad del gas.

C: velocidad del sonido.

2.6 VELOCIDAD DE SONIDO

La velocidad del sonido es una función de estado que depende del medio y las condiciones de presión y temperatura; viene definida por la ecuación:

$$C = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_s \dots\dots\dots 2.6.1$$

C: velocidad del sonido

P: presión

p: Densidad

La velocidad del sonido entonces dependerá del medio en que se propague la onda y sus condiciones, en este caso, un gas natural.

Para un proceso adiabático se cumple que:

$$P * v^{\gamma} = P * p^{-\gamma} = cte$$

Donde:

P: Presión.

v: volumen específico.

p: densidad.

γ: Coeficiente adiabático.

Entonces de la expresión

$$P * p^{-\gamma} = Cte$$

Despejando la presión

$$P = Cte * p^y$$

Derivando con respecto a la densidad

$$\frac{dP}{dp} = Cte * y * p^{y-1}$$

Reemplazando

$$\frac{dP}{dp} = P * p^{-y} * y * p^{y-1}$$

$$\frac{dP}{dp} = y * P * p^{-1}$$

Reemplazando:

$$C^2 = y * P * p^{-1}$$

Aplicando una ecuación de estado para gases reales:

$$P * p^{-1} = ZRT$$

$$C_i^2 = y_i * Z_i * R * T_i$$

$$C_i = \sqrt{y_i * Z_i * R * T_i} \dots \dots \dots 2.6.2$$

Donde:

C: Velocidad del sonido. m/s

y: Coeficiente adiabatico.

Z: factor de compresibilidad del gas.

R: Constante del proceso kJ/kg K

T: Temperatura. K La constante del gas *R* tiene un valor determinado para un cierto gas y sus condiciones PVT.⁵

2.7 COMPORTAMIENTO DEL GAS AL FLUIR POR UNA TOBERA LAVAL.

Habiendo definido así la relación entre la velocidad del gas y sus condiciones es necesario enfocar este estudio al comportamiento del gas cuando aumenta su velocidad de flujo, es decir, los cambios en sus condiciones a ir aumentando el número Mach; para ello usaremos clasificación del número mach:

Flujo incompresible: $Ma < 0,3$

Flujo subsónico: $0,3 < Ma < 0,8$

Flujo transónico: $0,8 < Ma < 1,2$

Flujo supersónico: $1,2 < Ma < 3,0$

Flujo hipersónico: $3,0 < Ma$

Cuando **Ma < 0,3**, las variaciones de densidad son relativamente pequeñas (menores del 5%); con lo que aunque el fluido sea un gas, puede considerarse como incompresible.

⁵ CENGEL Yunes A, BOLES Michael A, Termodinámica, séptima edición, MC Graw Hill, 2011, página 853.

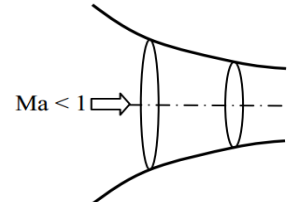
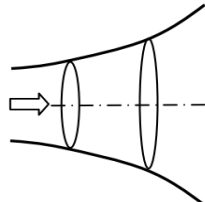
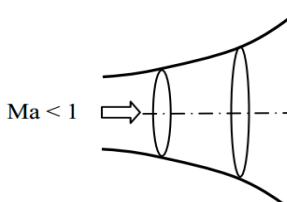
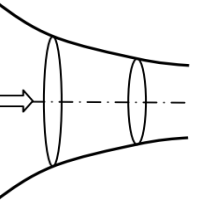
Cuando $Ma < 0,8$: en ninguna zona del flujo se producen ondas de choque.

Con $Ma > 0,8$: se pueden producir ondas de choque, de intensidad creciente conforme aumenta el número de Mach. Una consideración interesante es que en flujo externo, las fuerzas que el flujo ejerce sobre un objeto, tienen una dependencia muy diferenciada: a muy bajos Ma (estrictamente tendríamos que hablar de muy bajos números de Reynolds), el flujo sólo tiene que atravesar la propia geometría del objeto. Conforme el Ma aumenta, el desorden provocado por la capa límite, hace que la interacción fluido-superficie se extienda a zonas alejadas del objeto; y finalmente conforme el flujo se aproxima a condiciones sónicas, la aparición de las irreversibilidades con grandes aumentos de entropía de las ondas de choque, hace que se tenga que superar la denominada “barrera del sonido” en donde se tiene una alta interacción flujo-geometría, para acabar en los flujos hipersónicos con la aparición de ondas de choque oblicuas.⁶

Para el caso del twister que está conformado por toberas y difusores la variación del área para un flujo de gas provoca los siguientes cambios de presión (P), velocidad (V) a determinado régimen de flujo; número mach (Ma), los cuales pueden ser apreciados en la siguiente figura:

⁶ MARTÍNEZ DE LA CALLE, Julián. “Apuntes de Mecánica de Fluidos: 2ª parte . Flujo compresible”. Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Gijón. Universidad de Oviedo. {En línea}. {1 febrero de 2016} disponible en: (<http://myslide.es/documents/flujo-compresible.html>).

Figura 7. Cambios de presión y velocidad al variar el área que atraviesa un flujo de gas.

	Flujo de entrada SUBSÓNICO	Flujo de entrada SUPERSÓNICO
TOBERA $dv > 0$	$dv > 0$ $dp < 0$ $dA < 0$ $Ma < 1$  TOBERA CONVERGENTE	$dv > 0$ $dp < 0$ $dA > 0$ $Ma > 1$  TOBERA DIVERGENTE
DIFUSOR $dp > 0$	$dv < 0$ $dp > 0$ $dA > 0$ $Ma < 1$  DIFUSOR DIVERGENTE	$dv < 0$ $dp > 0$ $dA < 0$ $Ma > 1$  DIFUSOR CONVERGENTE

Fuente: MARTÍNEZ DE LA CALLE , op. cit, p.7

Donde:

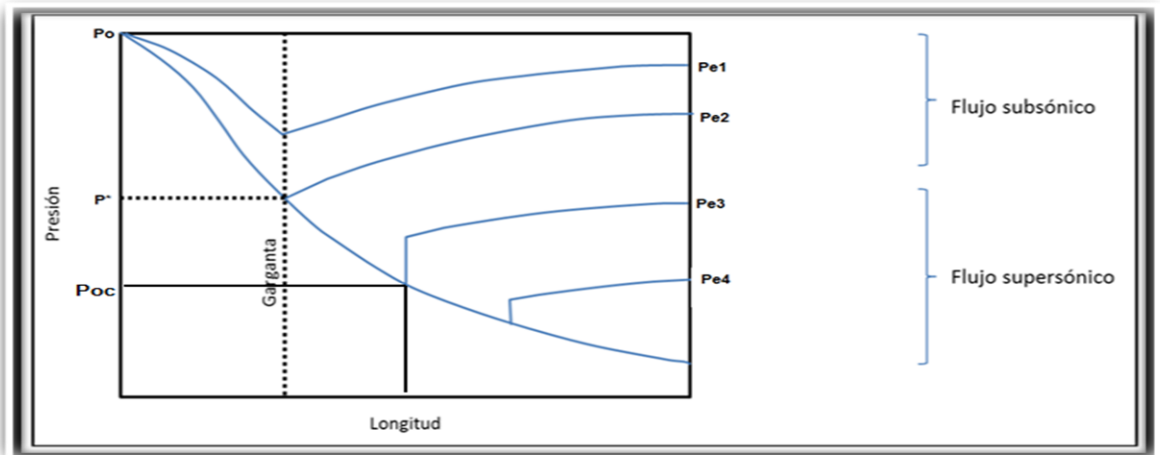
dV : *gradiente de Velocida.*

dP : *gradiente de Presión.*

dA : *gradiente de Area.*

Para lograr una expansión adiabática y luego re comprimir el gas tratado; el perfil de la caída de presión por esta geometría puede ser apreciada en la figura 8 en la cual se muestra la disminución de la presión con respecto al avance del flujo.

Figura 8. Disminución de la presión con respecto al avance del flujo por una tobera.



Fuente: MARTÍNEZ DE LA CALLE , op. cit, p.10

2.8 DESCRIPCIÓN DE UNA ONDA DE CHOQUE NORMAL:

Con un flujo supersónico, en función de la geometría y de las condiciones aguas abajo de la garganta, se pueden producir bruscos cambios de muy poco espesor (del orden de 10^{-6} m) a flujo subsónico, de marcado carácter irreversible y por tanto con aumento de entropía, equivalentes a discontinuidades en el flujo: es la denominada onda de choque normal. En donde se tienen altos gradientes de presión y de temperatura, en el sentido del flujo: $p_j > p_i$ y $T_j > T_i$.

De especial importancia en flujo alrededor de objetos a velocidades supersónicas, en donde se provoca una onda de choque aguas arriba del borde de ataque; la geometría de la onda de choque es perpendicular (normal) a las líneas de corriente del flujo incidente; lo que provoca una alta perturbación del flujo aguas arriba del objeto. En el caso de un gas a velocidad subsónica que se quiera llevar a velocidad supersónica, conforme se va acercando a condiciones sónicas: el flujo

se inicia convergente en el borde de ataque y finaliza divergente en el borde de estela; lo que lleva a que en alguna parte de la zona divergente, se empiece a tener flujo supersónico, en donde se pueden tener ondas de choque de alta disipación energética, produciendo que el coeficiente de arrastre aumente bruscamente, siendo necesario aportar potencias muy altas para atravesar la denominada barrera del sonido.

Debido al aumento de temperatura en una onda de choque de muy poco espesor, los gradientes térmicos son elevados y siempre en el sentido del flujo ($T_2 > T_1$), lo que implica alta velocidad de transmisión de calor.⁷

RELACIONES DE RANKINE-HUGONIOT.

Es este trabajo se realizara una aproximación del comportamiento de fluido que atraviesa una onda de choque en base a un gas ideal; descritas con la ecuaciones de RANKINE-HUGONIOT. Las cuales según el National advisory committee for aerounautics, report 1135, del año 1953, establece que:⁸

$$\frac{P_i}{P_j} = \xi = \frac{7Ma_i^2 - 1}{6} \dots\dots\dots 2.7.1$$

⁷ MARTÍNEZ DE LA CALLE, Julián. “Apuntes de Mecánica de Fluidos: 2ª parte . Flujo compresible”. Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Gijón. Universidad de Oviedo. {En línea}. {1 febrero de 2016} disponible en: (<http://myslide.es/documents/flujo-compresible.html>).

⁸ National advisory committee for aerounautics, report 1135, equations, tables, and charts for compressible flow by ames research staff, año 1953



$$Ma_2^2 = \frac{\xi + 6}{7\xi} \dots\dots\dots 2.7.2$$

$$\frac{T_j}{T_i} = \xi \frac{\xi + 6}{6\xi + 1} \dots\dots\dots 2.7.3$$

Donde:

i: antes de la onda choque

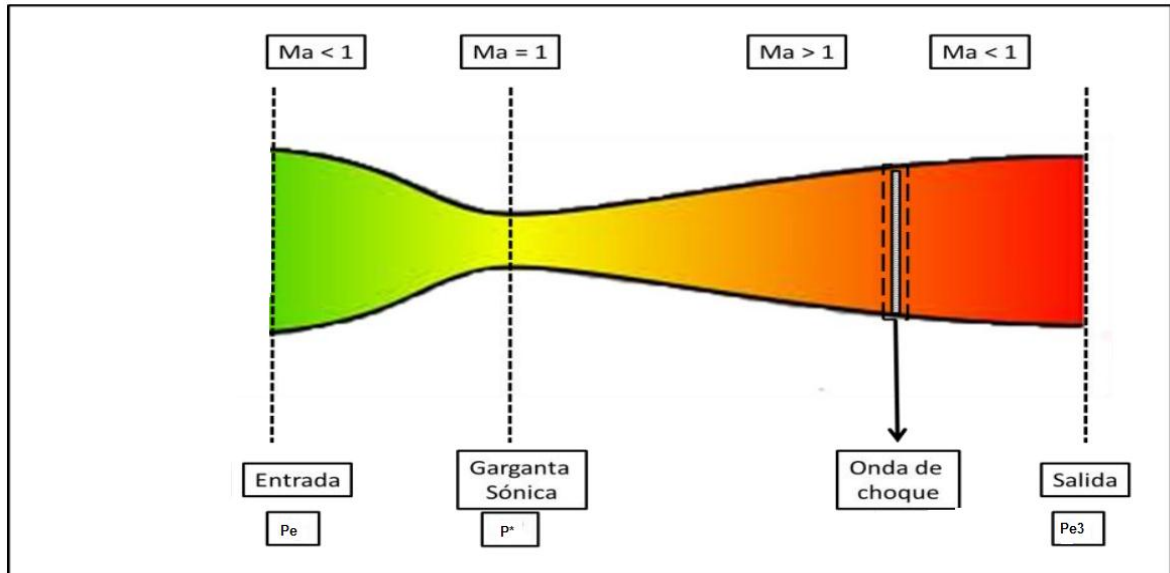
j: después de la onda de choque

3. GEOMETRÍA Y CONFIGURACIÓN DEL SEPARADOR SUPERSÓNICO TWISTER.

Particularmente para el Twister el recorrido de la caída de presión para el flujo de un gas sería **Po-P*-Poc-Pe3** en la Figura 8; dado que se produce una expansión adiabática, velocidades supersónicas, una onda de choque y una recompresión del fluido.

En este proceso el fluido es acelerado disminuyendo el área que atraviesa hasta la garganta (tobera convergente, flujo subsónico). Al pasar ésta, el fluido será acelerado con un aumento de área por tener un régimen de flujo supersónico (tobera divergente) hasta alcanzar una onda de choque normal; aquí hay un aumento de la entropía en un espacio muy pequeño ($10^{-6}m$) provocando un cambio finito y abrupto en las propiedades del gas: aumento de la temperatura, presión, densidad y disminución de la velocidad; desacelerando el fluido a un flujo subsónico donde damos cabida a la compresión adiabática por aumento de área (difusor divergente). En la figura 9 podemos apreciar el régimen de flujo en términos de número Mach y la presión.

Figura 9. Régimen de flujo en términos del número Mach y la presión

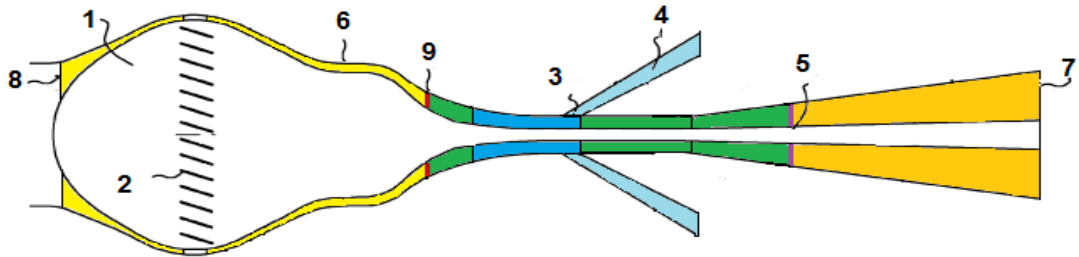


Fuente: Modificada por el autor GONZALEZ LIZCANO Nathalia Azucena BEJARANO VALENZUELA Allied Yaritza Análisis de los parámetros de flujo de una corriente de gas a través de un separador supersónico twister. 2012. Facultad de ingeniería físico químicas. Ingeniería de petróleos. <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/969/2/144172.pdf>

Dado que se ha descrito el efecto de expansión en el Twister y su relación con las condiciones de presión hay que especificar donde y como ocurre el cambio de fases.

Para ello detallamos la geometría y componentes principales del interior del separador supersónico en la figura 10.

Figura 10. Geometría y componentes principales del interior del separador supersónico



Fuente: Modificada por el autor, obtenida de: Betting, Marco, Tjeenk Willink, Cornelis Antonie, Van Bakel, Robert Petru. **Multistage cyclonic fluid separator - AU2009339468**. (En línea). (5 de enero de 2016). Disponible en <http://www.ipaustralia.com.au/applicant/twister-bv/patents/AU2009339468/>

1. Cuerpo interno: su función es adecuar la geometría para que se logre la expansión y compresión variando su forma, lo cual producirá cambios de áreas en la tobera y difusor.
2. Generadores de Vórtice: alavés o ductos guiados de tal forma que el fluido gire para crear un efecto centrífugo en el flujo de gas.
3. punto de desvío de Líquidos.
4. Aletas: Compartimiento de líquidos.
5. Onda de Choque.
6. Cubierta
7. Salida.

8. Boquilla de entrada

9. Garganta sónica.

Según los efectos y condiciones del gas está dividido en las siguientes regiones:

Zona Amarilla: representa la expansión adiabática del gas hasta las condiciones de presión, temperatura y saturación de líquidos que sean requeridos y junto con el efecto de generación de vórtice o torbellino. Según la geometría es una tobera que puede ser convergente o convergente-divergente según las condiciones de flujo sónico o supersónico respectivamente.

Zona Azul: representa la estabilización de las condiciones de flujo, se caracteriza por ser un ducto relativamente prolongado con área constante, en esta zona es donde ocurre el desvío de fases (punto 3 figura 10), la fase líquida pasa al compartimiento 4 o zona azul cielo para luego ser direccionada aun superador.

Zona Roja: representa la garganta o área mínima dentro del equipo ($Ma=1$).

Zona Verde: Representa la expansión del fluido a velocidades supersónicas ($Ma \geq 1$), puede o no existir; Si se efectúa una onda de choque en la garganta o tener un flujo subsónico ($Ma \leq 1$) a condiciones de separación.

Zona Violeta: Simboliza la onda de choque para un $Ma \geq 0.8$.

Zona Naranja: Simboliza la compresión adiabática del flujo de gas; Difusor con geometría divergente y régimen de flujo subsónico ($Ma \leq 1$).

Según su geometría el Twister está configurado de la siguiente manera:

**Tobera convergente (flujo subsónico)- tobera divergente (flujo supersónico)
- ducto estabilizador de flujo- tobera divergente (flujo supersónico) – difusor
divergente**

Este orden puede variar si se necesita lograr una expansión del flujo de gas adecuada a las condiciones objetivas.

4. DESCRIPCIÓN DE LA SEPARACIÓN DE FASES

4.1 EQUILIBRIO DE FASE

La condensación es el proceso por el cual una sustancia pasa del estado gaseoso a líquido. Condensar los contenidos no requeridos de vapor de agua e hidrocarburos del gas natural es la razón por la cual fue diseñado el separador supersónico Twister, gracias a que la caída de la presión en la tobera ocasiona un enfriamiento del gas, disminución de la temperatura, afectando las condiciones de equilibrio.

Todos los estados de las sustancias son afectados por las condiciones de presión y temperatura, del tipo de sustancia y en el caso de una mezcla de los componentes que la conforman, el diagrama que nos permite observar el estado de las sustancias en función de la presión y temperatura es llamado diagrama de fase. En la figura 11, se puede observar el diagrama de fases de una mezcla de gas natural Presión-temperatura (P-T).

Figura 11. Diagrama de fase PT

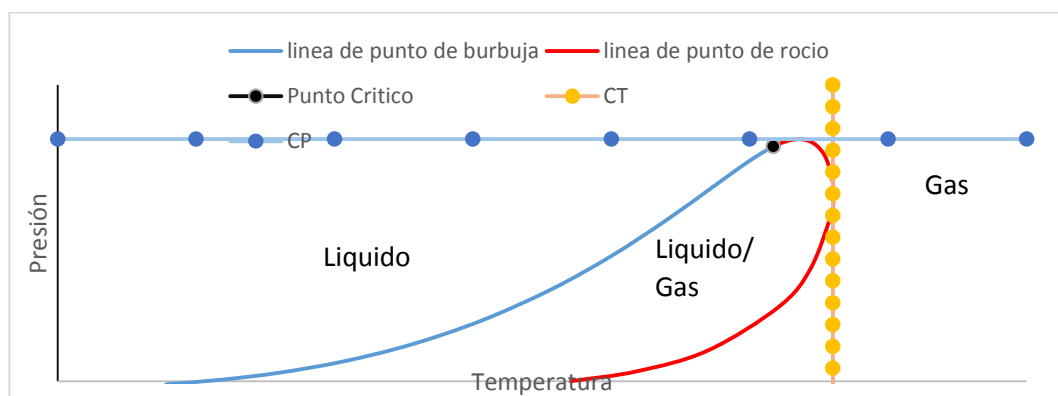


Diagrama de fase PT en el cual queda representado el equilibrio de fases de una mezcla. Tenemos en la zona derecha el estado líquido; en la izquierda la zona gaseosa; en la zona intermedia un equilibrio líquido gaseoso delimitada por las líneas de punto de burbuja donde ocurre la evaporización y líneas de punto de rocío donde se producen condensados del gas. El objetivo principal del separador supersónico Twister es lograr entrar en la envolvente de fases para condensar hidrocarburos a las condiciones deseadas.

4.2 CONTENIDO DE VAPOR DE AGUA EN EL GAS NATURAL WC

El estudio de esta contracción ha sido tratado por diferentes autores, es de vital importancia conocer y tratar el gas natural dado que el vapor de agua puede originar diferentes problemas operacionales durante la cadena de procesos y refinación; el proceso en cual a una mezcla de gas le es sustraída una cantidad de vapor de agua se le conoce como deshidratación del gas natural. Es importante resaltar que el vapor de agua y los HC son compañeros naturales dado que en el yacimiento existe un equilibrio entre ellos, sin embargo la baja solubilidad entre ellos permite establecer que no tiene efecto medible en la relación vapor-líquido del gas natural. Por ello se tendrán dos fases líquidas (agua y condensados del Gas natural), la cantidad de vapor de agua (**Wc**) en el gas estará determinada por la composición gas y las condiciones de presión y temperatura.⁹

Existe varios métodos para determinarlo como:

- ❖ Relación entre la presión parcial y la fugacidad parcial.

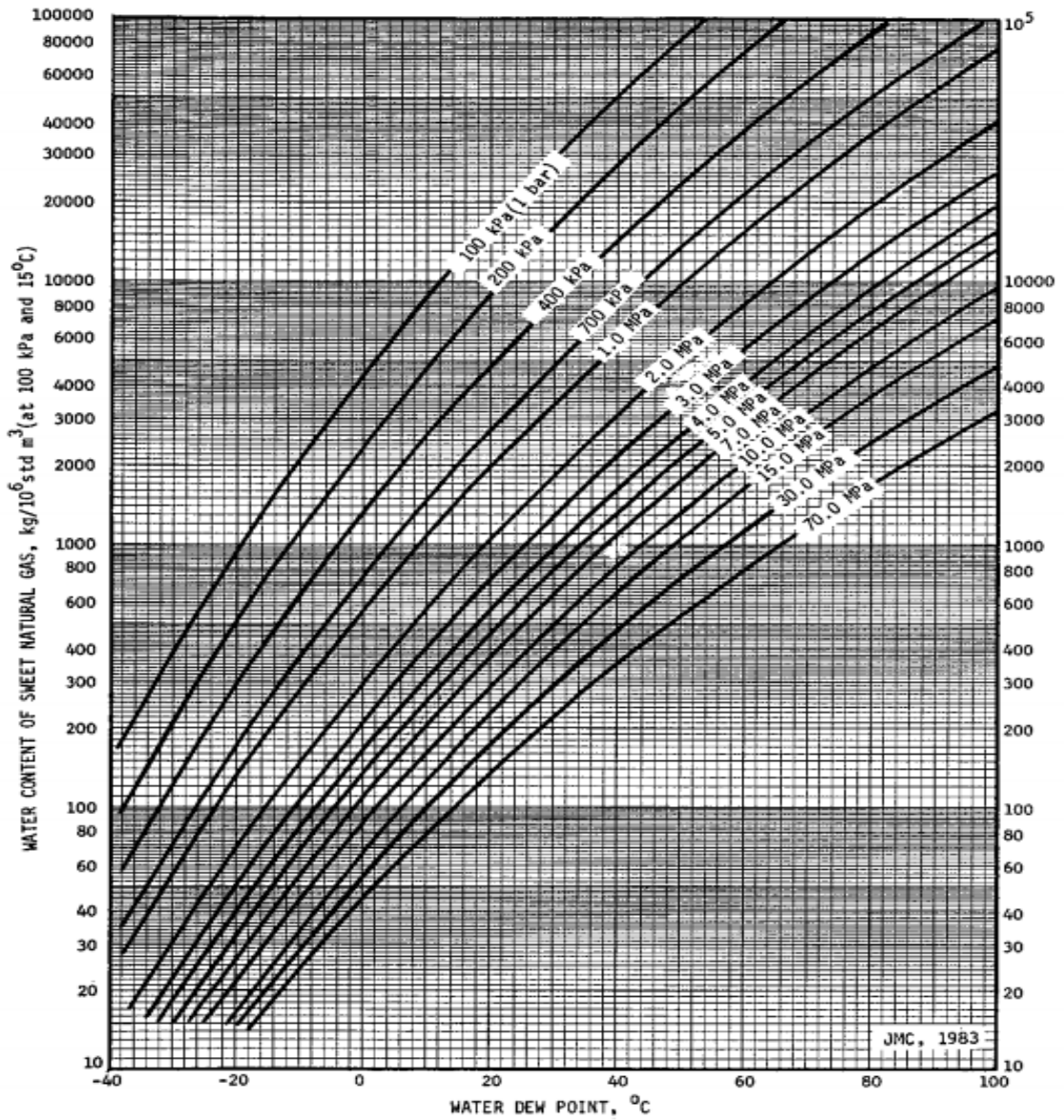
⁹ CAMPBELL, Jhon Gas conditioning and processing. Library of congress catalog card. Oklahoma: Campbel petroleum series, 1992. Vol 1.

- ❖ Datos o Tablas empíricas de contenido de agua versus la Presión y temperatura.
- ❖ Correcciones por presencia de contaminantes como CO₂, H₂S y N.
- ❖ PVT ecuaciones de estado.

En este trabajo usaremos las tablas empericas para un gas dulce señalas por Jhon CAMPBELL en su libro Gas conditioning and processing.

Figura 12. Contenido de vapor de agua en gas natural

WATER CONTENT OF GASES



Fuente: CAMPBELL, Jhon Gas conditioning and processing. Library of congress catalog card. Oklahoma: Campbel petroleum series,1992.Vol 1; 147p

La figura 12 representa la concentración de vapor de agua a diferentes condiciones de presión y temperatura para gas natural, sin embargo los componentes CO₂ y H₂S pueden afectar el contenido de vapor de agua, el cual no será tratado en este trabajo.

4.3 ESPECIFICACIONES DE CALIDAD DEL GAS

Las condiciones requeridas de Wc del gas varían según los requerimientos operacionales y el país donde es comercializado el fluido. Para el caso Colombia la

Norma establece lo siguiente:

Tabla 1. Especificaciones de calidad del gas. RUT.

Especificaciones	Internacional	Sistema Inglés
Máximo poder calorífico bruto GHV	42.8MJ/m ³	1.150 BTU/ft ³
Mínimo poder calorífico bruto (GHV)	35.4 MJ/m ³	950 BTU/ft ³
Contenido de Líquido	Libre de líquidos	Libre de líquidos
Contenido total de H ₂ S máximo	6 mg/m ³	0.25 grano/100PCS
Contenido total de azufre máximo	23 mg/m ³	1.0grano/ 100PCS
Contenido CO ₂ , máximo en % volumen	2%	2%
Contenido de N ₂ , máximo en % volumen	3	3
Contenido de inertes máximo en % volumen	5%	5%
Contenido de oxígeno máximo en % volumen	0.1%	0.1%
Contenido máximo de vapor de agua	97 mg/m ³	6.0 Lb/MPCS
Temperatura de entrega máximo	49 °C	120°F
Temperatura de entrega mínimo	7.2 °C	45 °F

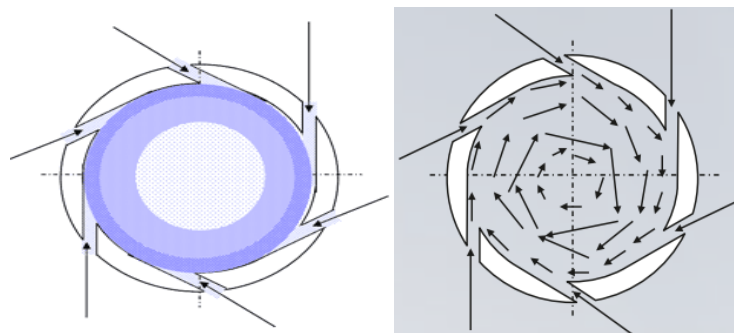
Especificaciones	Internacional	Sistema Inglés
Contenido máximo de polvos y material en suspensión	1.6 mg/m ³	0.7 grano/1000 PC

Fuente: Res. 054 de 2007. (2007). Comisión de Regulación de Energía y Gas. Min. De Minas y Energía.

4.4. DESCRIPCIÓN DE SEPARACIÓN DE FASES

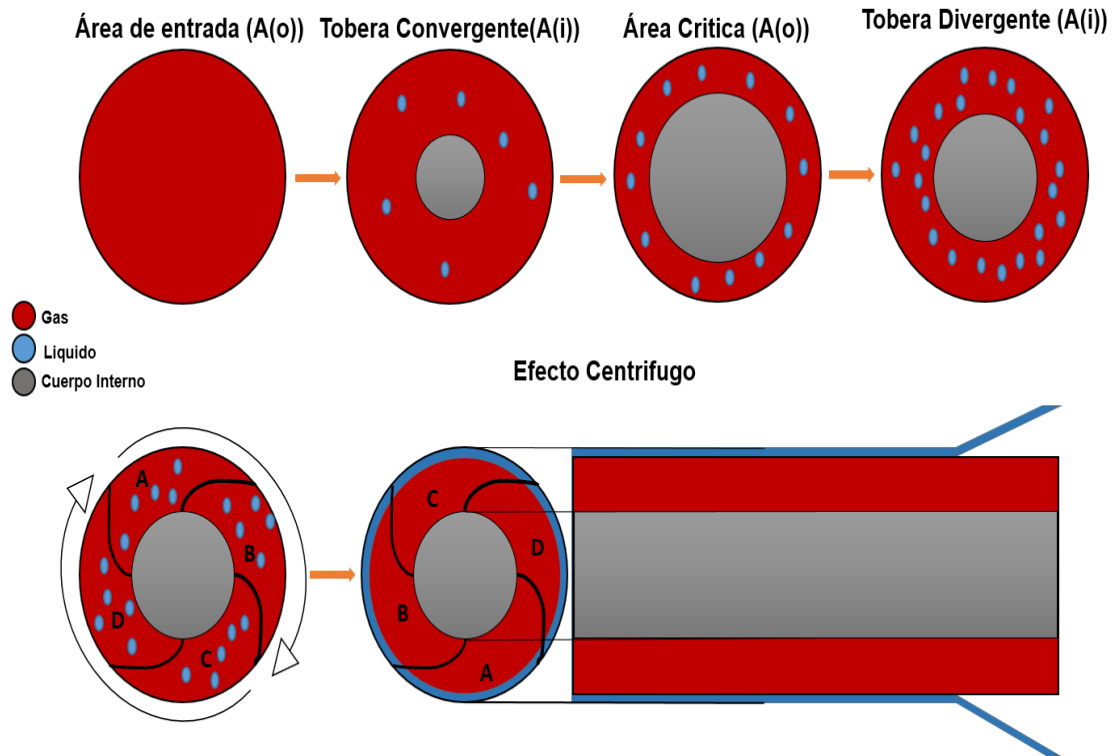
En el Twister el fluido es expandido y enfriado por el efecto de cambios de área en la primera etapa de la geometría (tobera laval), los cambios de área se efectúan variando la forma del cuerpo interno del Twister (figura 10 y 14). A medida que avanza el equilibrio de fases liquido/ gas va ir variando por las disminución de la presión y temperatura hasta las condiciones deseadas, luego el flujo es dirigido al generador de vórtice o torbellino llamada twister swirl (figura 13); en el cual sus ductos están dirigidos de forma tal que se aproveche su cinética para crear una especie de centrifuga que separara la fase liquida de la gaseosa por efecto de la diferencia de densidades .Los condensados viajara por las paredes de las toberas mientras que el gas seco en el centro de ésta, formando una especie de tornado figura 13 y 14

Figura 13. Twister Swirl.



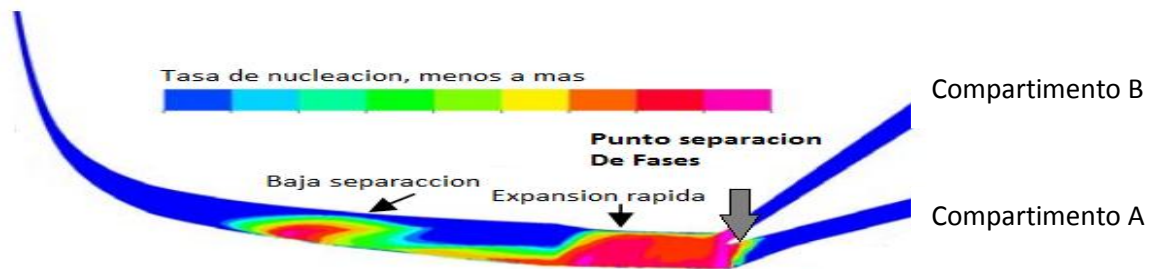
Fuente. TWISTERBV twister swirl valve [en línea] disponible en: <http://twisterbv.com/products-services/twister-swirl-valve/>

Figura 14. Separación de fases en la tobera



Este fenómeno permite separar los fluidos a condiciones requeridas para obtener los condensados HC o vapor de agua, dado a que presentan diferentes temperaturas y presión de saturación; para ser más específico lo que se hace es una desviación del fluido líquido como muestra la figura 15.

Figura 15. Perfil de la tasa de nucleación en el twister.



Fuente: Modificada por el autor, tomada de PRAST, Bart; LAMMERS, Bart & BETTING, Marco. Cfd for supersonic gas processing. Fifth International Conference on CFD in the Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia. (En línea) (Noviembre de 2015). Disponible en http://www.cfd.com.au/cfd_conf06/PDFs/027Pra.pdf

La Figura 15 muestra la desviación del líquido al compartimiento B y el Gas al Compartimiento A.

El compartimiento B guiará los líquidos a un separador, mientras el compartimiento A enviará el gas a la etapa de compresión dentro del equipo.

5. DIAGRAMAS DE FASES APLICADAS AL TWISTER

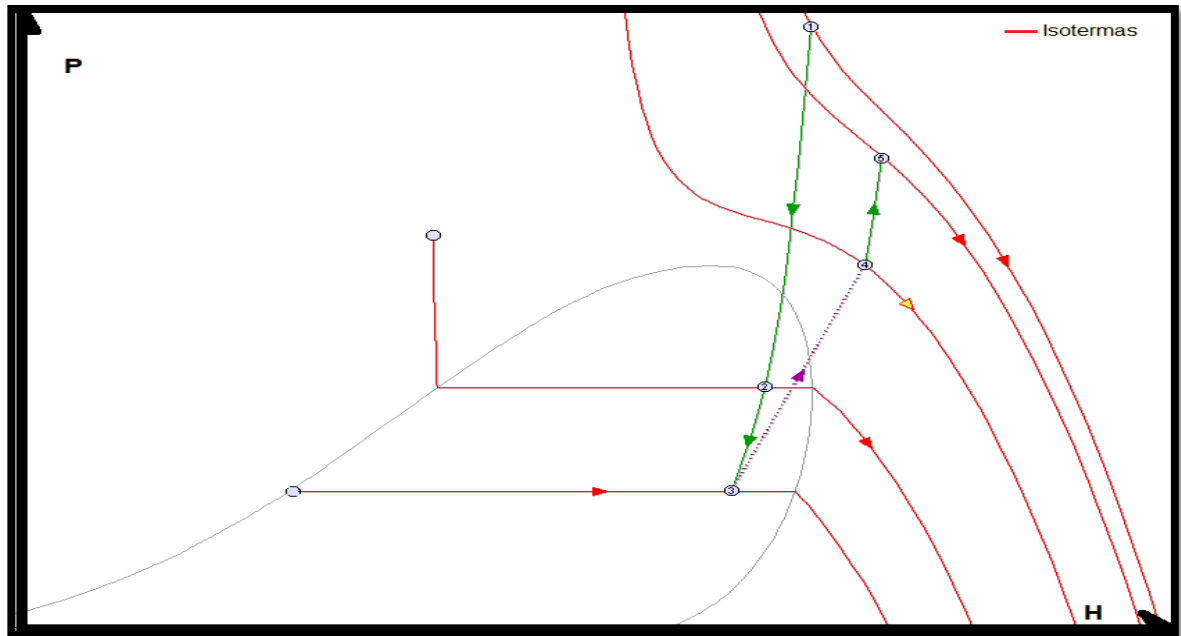
5.1 DIAGRAMA P-H PARA SEPARADOR SUPERSÓNICO TWISTER.

Es importante establecer que el diseño del twister está basadas en varios aspectos:

- Composición de gas.
- Condiciones Operacionales
- Reglamento o requerimientos de la calidad del gas en la región donde se efectuará el proceso.
- proceso adiabático reversible (isentrópico).

En este caso se mostrara en un diagrama presión-entalpía PH y presión entropía P-S de un gas tratado para control de punto de rocío, obtención de gas licuado del petróleo (GLP) y deshidratación, lo que conllevaría a la representación del potencial del equipo.

Figura 16. Diagrama P-H para el proceso de deshidratación y recobro de GLP con supersónico twister

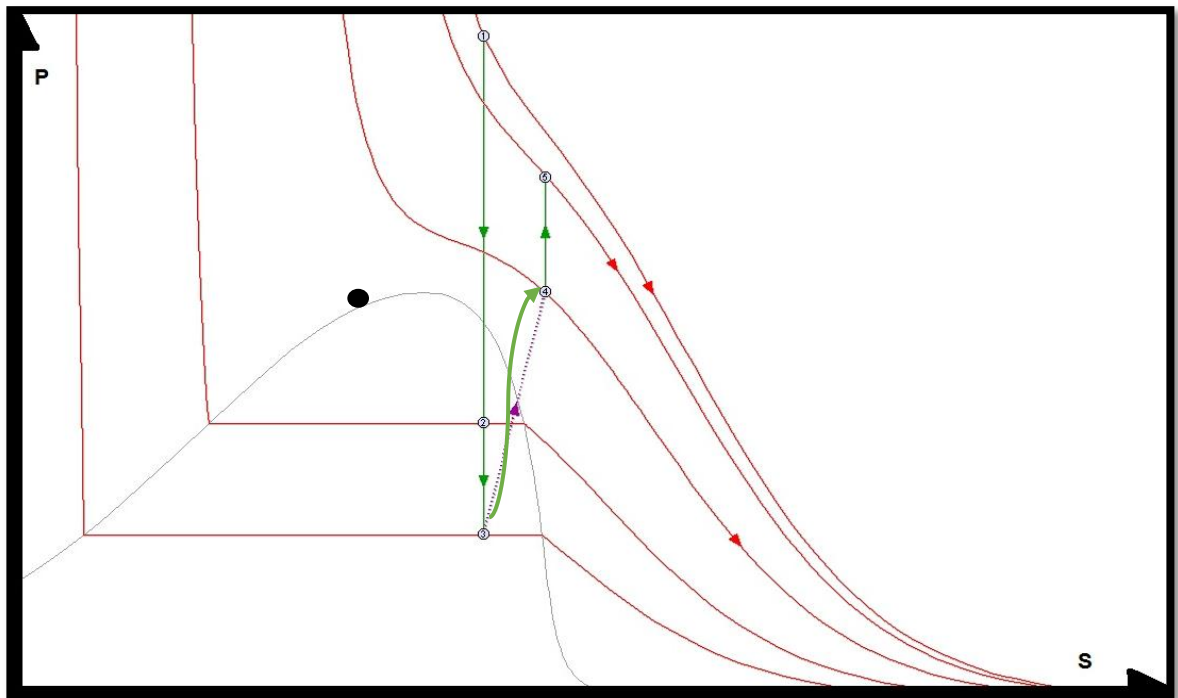


El Diagrama Presión-entalpía (PH) nos permite observar el comportamiento de una sustancia al fluir por el Twister para control de punto de rocío. La ruta empieza por el punto (1) a la entrada de la boquilla del separador supersónico, sufre una expansión adiabática reversible (isentrópica) a medida que avanza en la tobera convergente divergente hasta el punto (2) donde se produce la separación de fases. Aquí se desvía la corriente de líquido y gas en las condiciones requeridas a velocidades supersónicas. Luego, el gas sigue su camino por la tobera donde alcanza altas velocidades supersónicas, en los puntos (2)-(3), en la que sigue presentándose una expansión del gas adiabática. Los puntos (3) y (4) representan el paso del gas a través de la onda de choque donde se produce un gran aumento en la entropía, además, todas las propiedades del gas sufre un cambio abrupto (altos gradientes de temperatura y presión), siendo desacelerado a un estado subsónico, del punto (4); el gas fluye hacia el difusor divergente para

aprovechar su cinética en un proceso de compresión adiabática (isentrópica) y alcanzar las condiciones de salida.

5.2 EL DIAGRAMA PRESIÓN-ENTROPÍA P-S APLICADO AL TWISTER.

Figura 17. Diagrama P-S para el proceso de deshidratación y recobro de GLP supersónico twister.



En el diagrama presión - entropía (**PS**), podemos apreciar el mismo recorrido descrito en el diagrama anterior sin embargo se puede evidenciar con más claridad el aumento de entropía que se produce en la onda de choque puntos (3) y (4).

6. MODELAMIENTO MATEMÁTICO Y FÍSICO

6.1 CONSIDERACIONES, LÍMITES Y CONDICIONES.

Para modelar el proceso al interior del twister se debe establecer los límites o condiciones acerca del flujo:

- Un proceso adiabático reversible isentrópico en la tobera y difusores.
- Flujo para una mezcla de gas real es decir un gas con calor específico (C_p), coeficiente adiabático (γ), densidad (ρ) factor de compresibilidad (Z) Variable.
- Depreciación de las fuerzas viscosas.
- Ecuaciones para un flujo de gas unidimensional.
- Se utilizaron algunas aproximaciones para gases ideales en el estudio de las ondas de choque normal.
- No se consideró arrastre de líquidos en el flujo de gas.

6.1.1. Condiciones de diseño: La geometría del diseño:

Longitud (L) = 1m

Longitud de expansión 0.65 m,

Longitud de compresión 0.23-0.24 m

“promedio tomado en la literatura”.¹⁰

$$A_s = \frac{1}{2} A_o.$$

$$A_{oc} = \frac{3}{4} * (A_s - A_c).$$

¹⁰ GUEVARA LUNA, Marco Andrés, “Diseño de un equipo de recuperación de líquidos de gas natural empleando CFD”, Bogotá D.C, Colombia 2015, página 70 .

$$Ac \xrightarrow{\text{Cuando}} Ma_i = 1.$$

Donde:

A_0 : Área de entrada (m^2)

A_s : Área de salida (m^2)

A_{oc} : Área onda de choque (m^2)

A_c : Área crítica (m^2)

6.2. ECUACIONES Y MODELOS MATEMÁTICOS

Relanzando las ecuaciones (2.4.1), (2.6.2) en la ecuación (2.3.8) y ordenando tenemos:

$$Cp_i * T_i + \frac{mV_i^2}{2} = H_0 = Cp_0T_0$$

Donde:

H_0 : condición de estancamiento o Energía máxima del sistema.

$$\frac{T_0}{T} = \frac{Cp_i}{Cp_0} + \frac{C_i^2 * Ma_i^2}{2Cp_0}$$

$$\frac{T_0}{T} = \frac{Cp_i}{Cp_0} + \frac{y_i * Z_i * R * Ma_i^2}{2Cp_0}$$

Dado la función T vs Ma representan una función implícita; es mucho más cómodo afrontar el tema en función de la temperatura y la entalpia por lo tanto:

$$h_i + \frac{V_i^2}{2} = h_j + \frac{V_j^2}{2}$$

Como en la tobera ocurre una transformación de la entalpía en energía cinética se obtiene que:

$$V_j = \sqrt{2000 \left(\|h_i - h_{j(T_j, P_j)}\| + \frac{V_i^2}{2000} \right)} \quad (\text{m/s}) \dots\dots\dots 6.2.1$$

h: Entalpía (kJ/Kg)

V: Velocidad (m/s)

Con:

$$C_j = \sqrt{y_i * Z_i * R * T_i} \quad (\text{m/s})$$

$$Ma_j = \frac{V_j}{C_{j(T,P)}}$$

Como observamos Y_j , Z_j , H_j , depende de la temperatura y presión del proceso y la composición del gas.

6.2.1 Ecuación de estado Peng Robinson PR. Para determinar estas variables se usó el simulador Aspen Hysys con el paquete de ecuaciones de estado Peng Robinson en un proceso de expansión/compresión isentrópico.

La expresión general de la ecuación es la siguiente

$$P = \frac{RT}{v - b} - \frac{a_c * \alpha}{v^2 + 2vB - b^2}$$

Donde

$$a_c = 0.457235 * \frac{R^2 T_c^2}{P_c}$$

$$b = 0.07796 * \frac{RT_c}{P_c}$$

$$\alpha = \{1 + m(1 - T_r^{0.5})^2\}$$

$$m = 0.97464 + 1.54226w - 0.26992w^2$$

Regla para mezcla

$$a_c = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_i X_j (a_i a_j)^{0.5} (1 - k_{ij})$$

$$a_c \alpha = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_i X_j (a_i a_j)^{0.5} (a_j a_j)^{0.5} (1 - k_{ij})$$

$$b = \sum_{i=1}^n x_i b_1$$

6.2.2. Aproximaciones de los cambios de propiedades. Dado que para un gas real los cambios de las propiedades son muy complejas, se usó el simulador Aspen Hysys para obtener datos y crear una serie de regresiones mediante tablas que corresponden a un proceso isentrópico. Éstas nos permiten establecer los valores de las variables dependientes con relación directa a la temperatura.

Se tomó hasta 5 cifras significativas para cada constante, con el fin de reducir error en los datos.

Considerando que un gas real en un proceso adiabático reversible (isentrópico) las relaciones entre las propiedades y la temperatura están descritas en las ecuaciones del capítulo 2 tenemos:

6.2.2.1 Regresión exponencial presión temperatura P vs T

$$P_i = A * T_i^B$$

Donde A y B son constantes.

6.2.2.2 Regresión exponencial densidad temperatura p vs T

$$p_i = A * T_i^B$$

Donde A y B son constantes.

6.2.2.3 Regresión polinomial grado 3 entalpia temperatura H vs T

$$H_i = a + b * T_i^1 + c * T_i^2 + d * T_i^3$$

a, b, c y d son constantes.

6.2.2.4 Regresión polinomial grado 3 coeficiente de compresibilidad temperatura Z vs T

$$Z_i = a + b * T_i^1 + c * T_i^2 + d * T_i^3$$

a, b, c y d son constantes.

6.2.2.5 Regresión polinomial grado 3 coeficiente adiabático temperatura Y vs T

$$Y_i = a + b * T_i^1 + c * T_i^2 + d * T_i^3$$

a, b, c y d son constantes.

6.2.3 Ecuación de continuidad y conservación de la masa.

$$m = p * A * V \dots \dots \dots 6.2.3.1$$

Donde:

m: Flujo másico (kg/s)

p: densidad (Kg/m³)

A: Área transversal (m²)

V: Velocidad (m/s)

Dado que el flujo másico es constante entonces

$$m_i = m_{i+1}$$

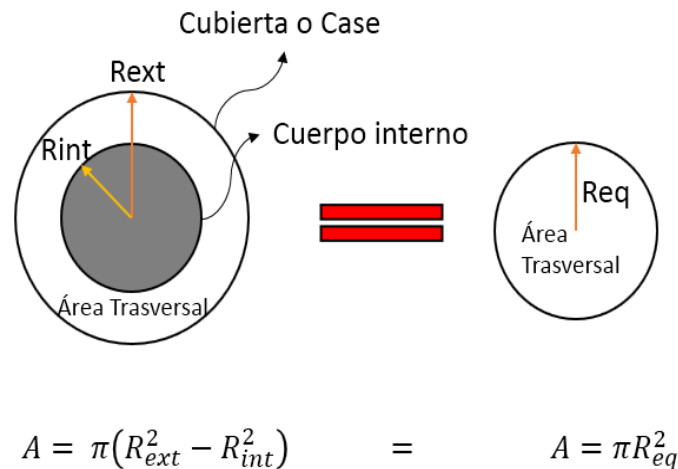
$$p_i * A_i * V_i = p_{i+1} * A_{i+1} * V_{i+1}$$

$$A_{i+1} = \frac{p_{i+1} * A_{i+1} * V_{i+1}}{p_{i+1} * V_{i+1}} \quad (m^2) \dots \dots \dots 6.2.3.2$$

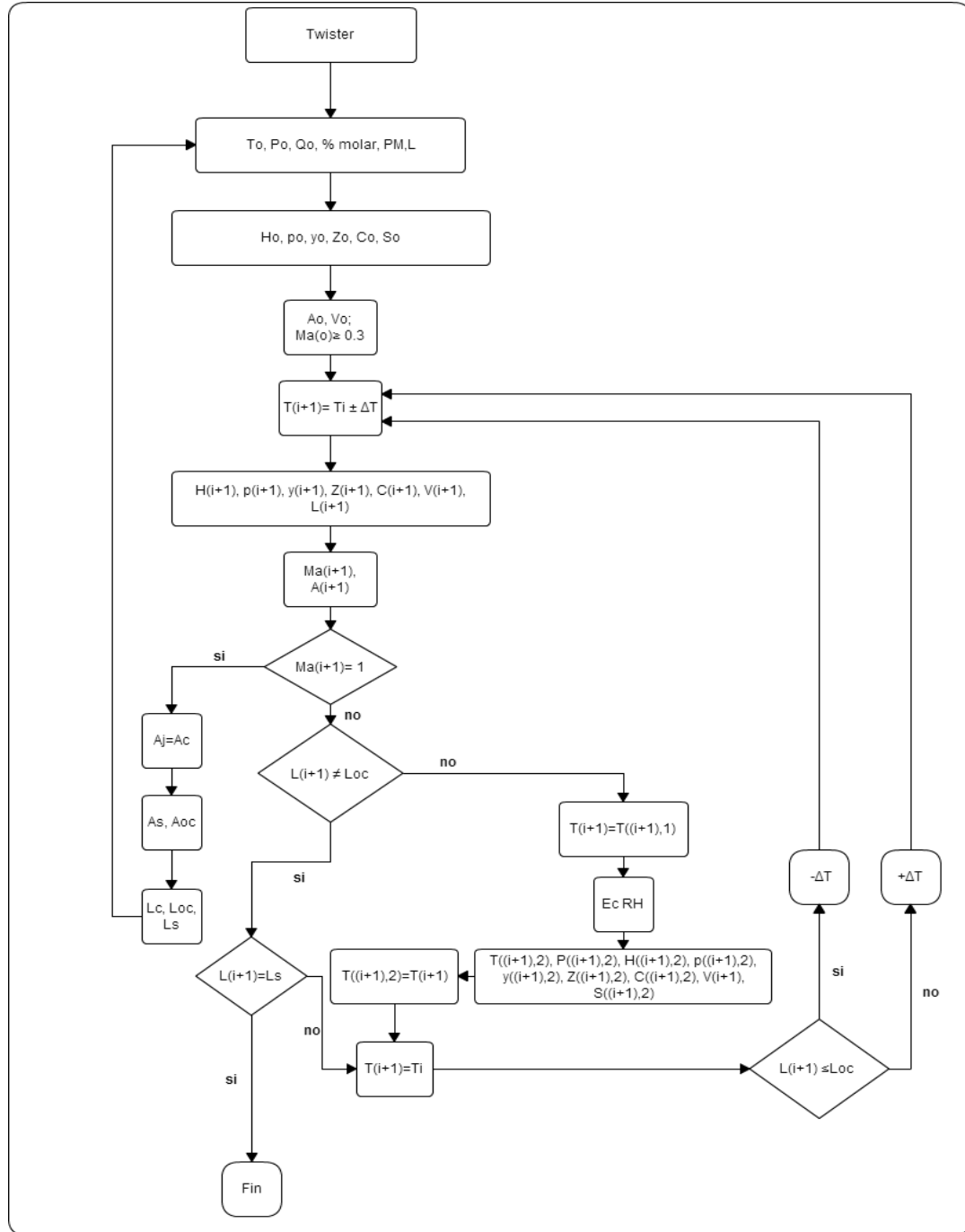
6.2.4 Concepto de Radio equivalente.

En el Twister la geometría del cuerpo interno es la que varía para crear los cambios de áreas, es por eso que se tiene un flujo anular dentro de este. Para este estudio se utilizará el concepto de radio equivalente que no es más que una equivalencia del área transversal en el twister en un punto y el área de un círculo, este concepto tiene como objetivo simplificar el estudio y facilitar la comprensión de los fenómenos dentro del twister.

Figura 18. Radio Equivalente.



6.3 DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CÁLCULO



7. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Se tiene un flujo de gas natural el cual se hará pasar en el interior de un twister diseñado bajo las condiciones descritas en los capítulos 2, 3, 4, 5 y 6; el proceso empezara con las condiciones del gas justo en la boquilla de entrada del equipo, por el cual no se tendrá en cuenta el diseño exterior de tuberías y equipos que complementan el uso del separador supersónico Twister.

Composición del gas:

Tabla 2. Composición gas natural

Gas natural				
Componente	X_i	PC (kpa)	TC (k)	Ma (g/mol)
C1	0,953	4640,680	190,699	16,040
C2	0,031	4883,850	305,420	30,070
C3	0,015	4256,000	369,890	44,090
H2o	0,001	22120,000	647,300	18,020
Mezcla	1,000	4655,950	197,291	16,897

DP HC: 218.5 K (-66.37 °F)

Caso Base: Se tiene un flujo de gas de 50 MMSCFD a una presión 10342 kpa (1500 psi) y 302.6 k (85°F):

Wc: 27 lb/MMscf

Variables de entrada:

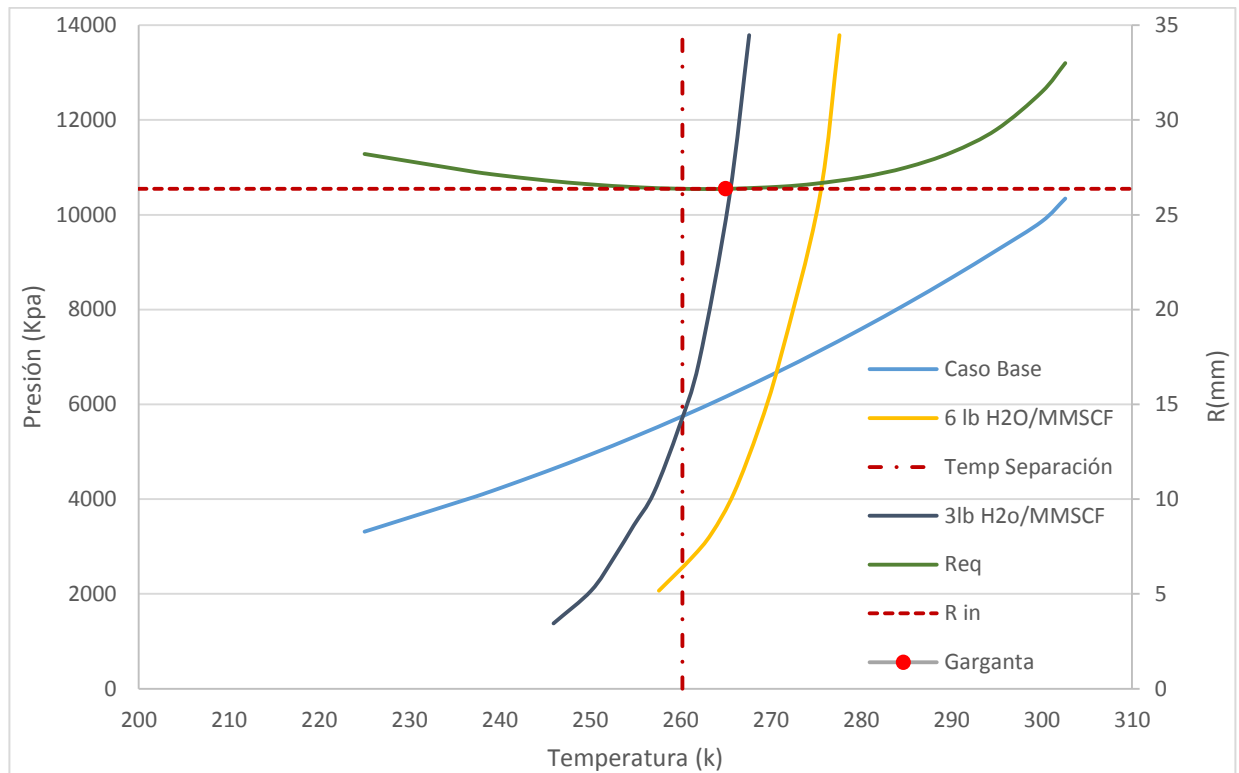
Se aplicó la metodología expuesta en el capítulo 6.3, usando como parámetro el requerido de calidad del gas de la figura 15; 3lb de H₂O/ MMSCF y 6lb de H₂O/MMSCF para Colombia dado que el gas tiene un DP HC menor al requerido.

Se elaboró un análisis de la geometría y diseño de Twister, junto con las propiedades del fluido del cual se obtuvieron los resultados presentados a continuación.

7.1 EXPANSIÓN ADIABÁTICA DEL GAS

Es importante recordar que el principal objetivo del twister es condensar líquidos no requeridos de una corriente del gas y separarlos para ello la figura 19 nos mostrara la caída de presión y temperatura en la tobera.

Figura 19. Expansión adiabática del gas natural caso base.



En la figura 19. Se observa el comportamiento de la presión, temperatura a medida que el gas va atravesando la tobera (representadas en la línea azul y verde).

La línea azul representa la curva $PvsT$ en la tobera con P en el eje principal de la Abscisa. La línea verde representa la geometría; $RvsT$ con radio (R) en el eje secundario de la abscisa, se tomó el radio equivalente en milímetros dado que los valores de área en SI son muy pequeños para ser representados.

La grafica se debe leer de derecha a izquierda dado que las condiciones de presión y temperatura son mayores al inicio del proceso. El valor más bajo de $RvsT$ representa la garganta radio critico (R_{cr}), punto rojo, lo cual nos permitirá

observar también el régimen de flujo dentro de la tobera; si es subsónico (antes de radio crítico R_{cr}) o supersónico (después del R_{cr}).

Se realizó este análisis de esta forma para representar la relación entre las condiciones y geometría.

La línea azul oscuro y la línea amarilla constituye la línea de punto de rocío del gas para que tenga una concentración de agua de 3lb/MMSCF y 6lb/MMSCF respectivamente (datos obtenidos de la figura 12); a partir de ellas las zonas a la derecha de esta representa mayor contenido de vapor de agua en el gas y la zona izquierda lo contrario.

Para la lectura de este gráfico primero se debe determinar el intercepto de la línea azul y la azul oscuro, que representa las funciones P_v vs T . Luego debemos subir perpendicularmente al eje de temperatura hasta el intercepto con la línea verde donde obtenemos la lectura del radio equivalente para las condiciones deseadas.

Los datos obtenidos para la etapa de expansión serían:

$W_{ci} = 27 \text{ lb/MMscf}$

$R_i = 33 \text{ mm}$

Para 3 lb/MMSCF

$R_{sep} = 26.37 \text{ mm}$

$R_{cr} = 26.367 \text{ mm}$

Tobera Convergente-divergente

$Ma = 1.01$

Régimen de flujo supersónico.

Temperatura = 260.02 k.

Presión = 5733.9 kpa.

A estas condiciones el gas al estabilizador de vórtice. Figura 14

En la cual serán removidos 24 lb de H₂O/MMscf de gas de vapor de agua para que el gas alcance 3 lb H₂O/MMscf de Wc.

Dado que $R_{sep} \approx R_{cr}$ se realizara una expansión adiabática hasta $Ma=1.3$, una onda de choque y una expansión adiabática, los cuales pueden ser visualizados a continuación.

7.2 COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS DE FLUJO EN EL TWISTER.

Se estudia a continuación la caída de Presión en el Twister:

Figura 20. Caída de Presión a lo largo de separador supersónico Twister obtenida del procedimiento para 3lb h₂o/MMscf.

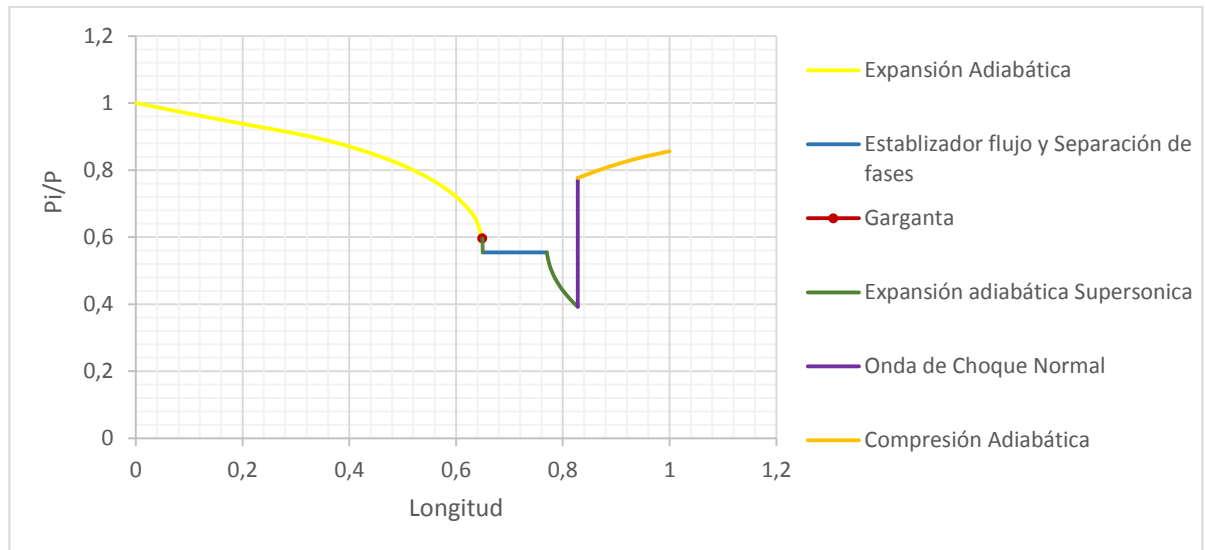
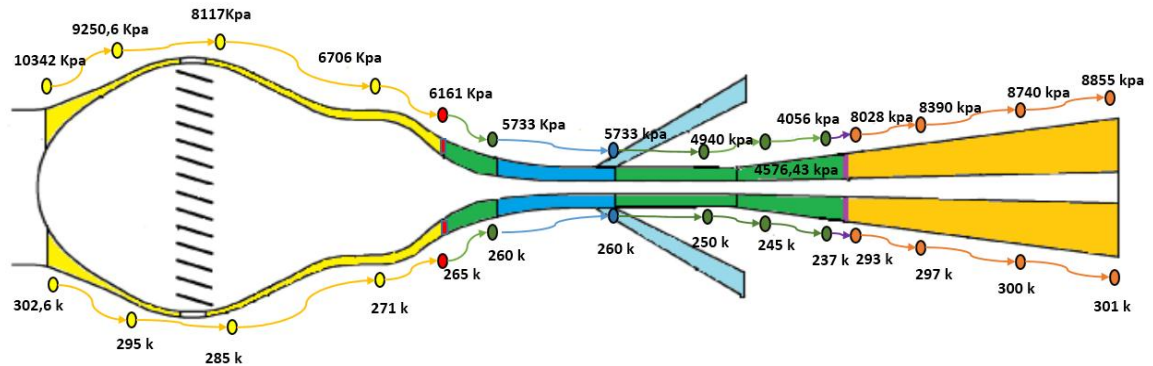


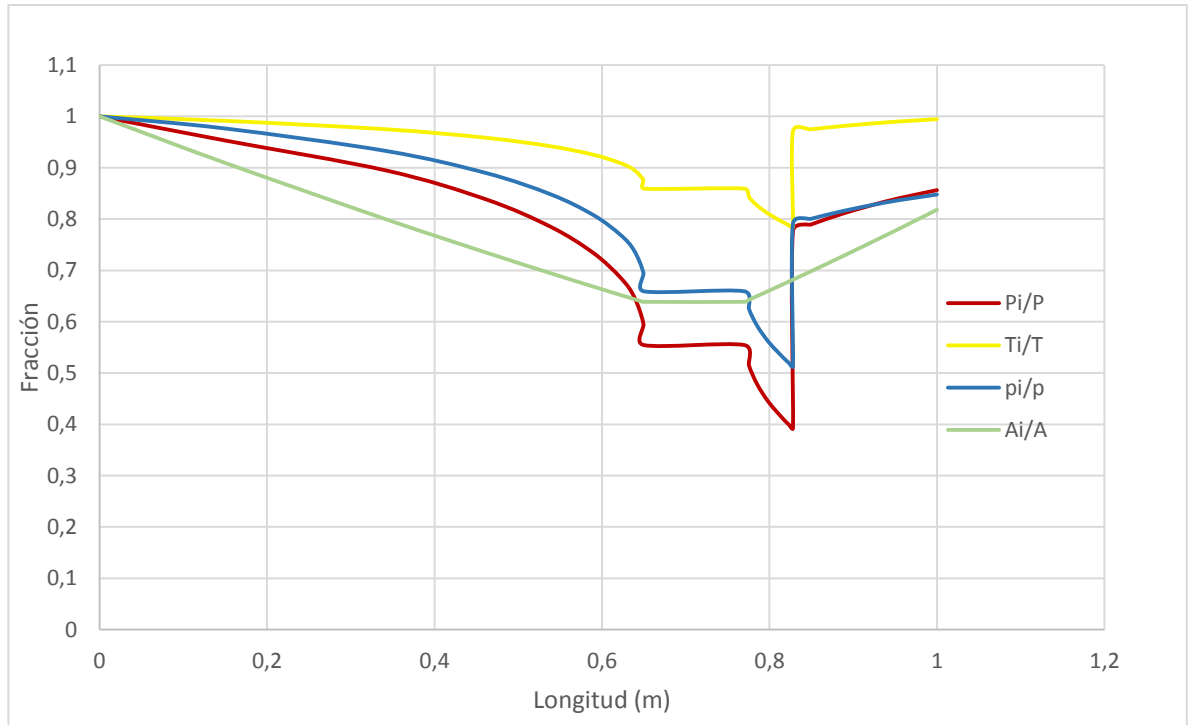
Figura 21. Esquema del twister y representación de los procesos dentro de este para 3lb h2o/MMscf



Fuente: Modificada por el autor, obtenida de: Betting, Marco, Tjeenk Willink, Cornelis Antonie, Van Bakel, Robert Petru. Multistage cyclonic fluid separator - AU2009339468. (En línea). (5 de enero de 2016). Disponible en <http://www.ipaustralia.com.au/applicant/twister-bv/patents/AU2009339468/>

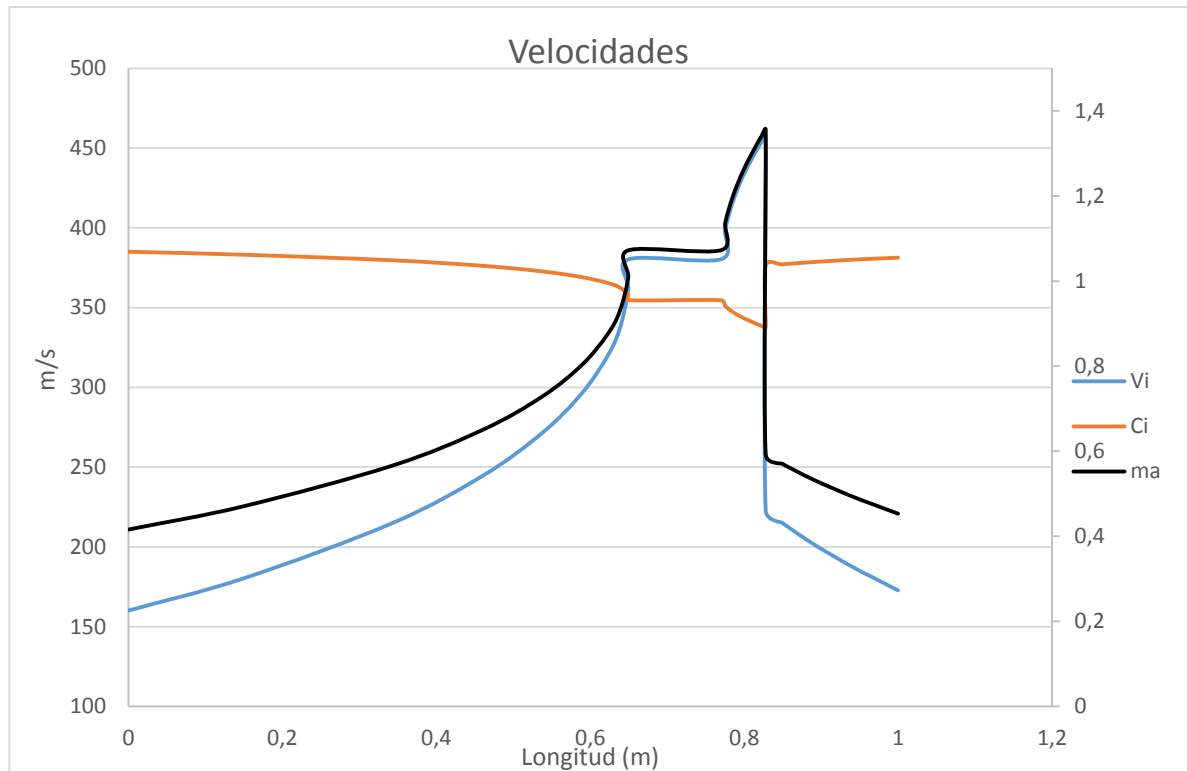
La figura 20 se cita junto la figura 21 para observar el comportamiento del gas en cada etapa como ya se había citado en la figura 10, Podemos observar que el modelo empleado recrea una expansión adiabática (zonas y líneas amarilla, roja, verde), una onda de choque (línea Morada) y una compresión adiabática (zona y línea naranja). La longitud de cada proceso varía gracias a que la expansión hasta las condiciones requeridas demanda mayor longitud puesto que se tiene que lograr una estabilización de flujo y sus condiciones; esto provoca que para cada zona exista un $\frac{\partial A}{\partial L}$ diferente definida por el cuerpo interno del Twister. Es importante resaltar que para la compresión no necesita una geometría muy prolongada; en la figura 20 apreciamos que la compresión total del gas ocurre en menos 38% de la longitud alcanzando alrededor del 79% de presión inicial.

Figura 22. Geometría y propiedades del gas al fluir dentro del Twister obtenida del procedimiento para 3lb/MMSCF.



En la figura 22 observamos los cambios de las propiedades del gas natural, junto con las Áreas que se usaron para provocar los cambios en el sistema. Se puede apreciar que los cambios de presión son mucho mayores a los de temperatura y que el gas se expandirá más rápido a velocidades supersónicas.

Figura 23. Velocidad y velocidad del sonido del gas natural y numero Mach obtenida del procedimiento.

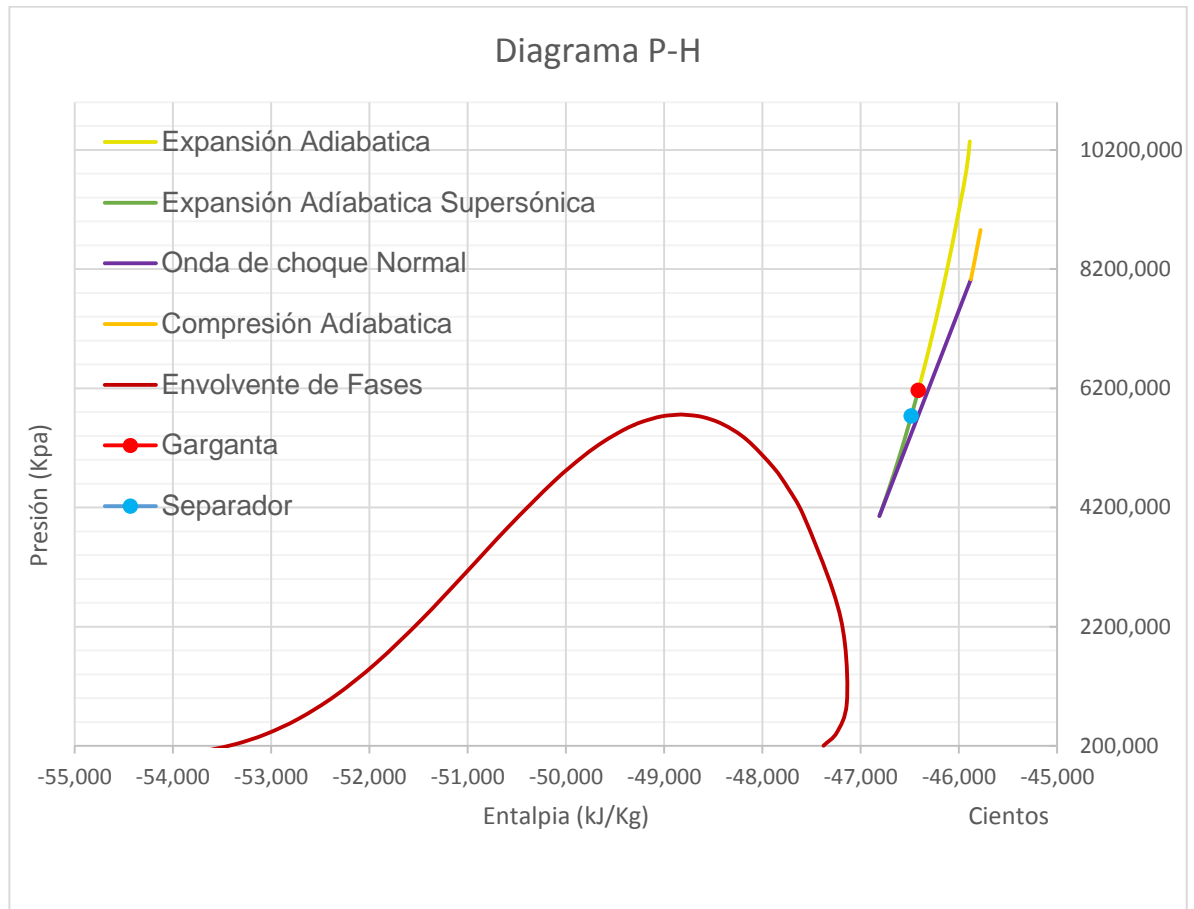


En la figura 23, apreciamos los cambios de las velocidades del gas, tanto la del sonido, cierta dependencia a la temperatura, como la velocidad lineal del gas que dependerá de la transformación de la energía o entalpía en energía cinética. Si bien se puede prestar atención que el gas pasa a tener una gran aceleración en una longitud muy pequeña; lo que nos permite concluir que una molécula solo estaría una fracción de segundo en el Twister es por eso que se considera a las toberas y difusores con eficiencia muy altas.

Si $Ma_i = \frac{V_i}{C_i}$ en el eje secundario observamos el régimen de flujo (línea negra) para este caso las condiciones de separación se alcanzaron en un flujo supersónico, sin embargo si se requiere mayor recobro de agua y aún más para recobro GLP

se deberá ir más a fondo, en la gráfica podemos observar el gradiente de desaceleración de flujo del gas al atravesar la onda de choque pasa de un flujo supersónico ($Ma \approx 1.3$) a un flujo subsónico ($Ma \approx 0.59$).

Figura 24. Diagrama P-H obtenida de Twister procedimiento.

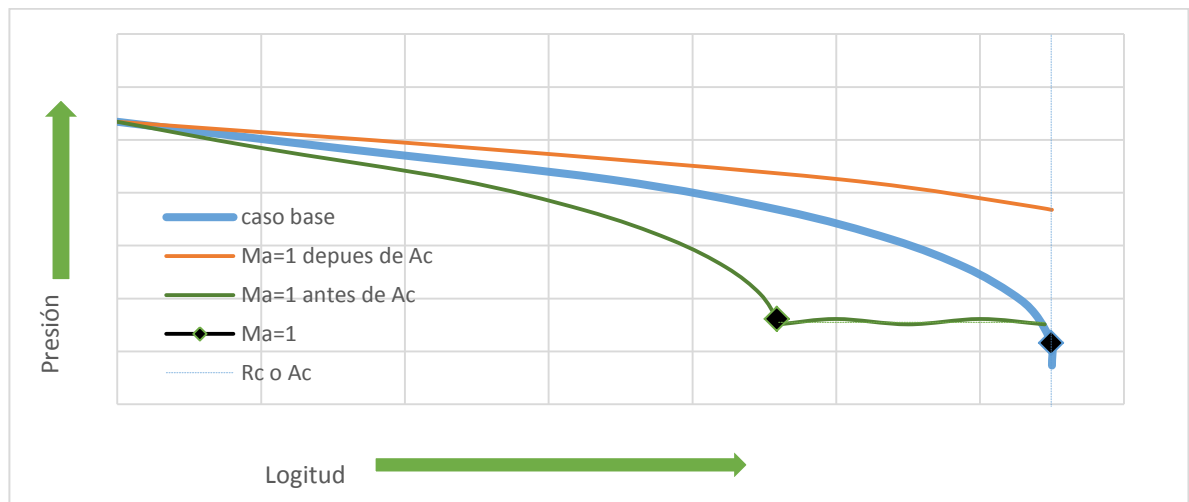


7.3. EFECTOS Y CAMBIOS DE LOS PARÁMETROS DE FLUJO AL VARIAR LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

7.3.1 Conceptos Preliminares La variación en las propiedades físicas y de volumen de gas a en la entrada del twister producirán cambios significativos en

las condición de flujo (Numero Mach) y en los efectos de expansión y compresión, para preparar al lector sobre cómo afecta los cambios de presión, temperatura, velocidad de flujo o inclusive de la composición del gas natural es necesario tener en cuenta los siguientes fenómenos observados en la figura 25.

Figura 25. Condición $Ma=1$ al variar las los parámetros de flujo.



En la figura 25 representan los efectos y condición de flujo al variar un parámetro de entrada al twister hasta la etapa del separador, son curvas de expansión en donde observamos el caso base o caso para el cual fue diseñado Twister en la línea azul; detallamos en el figura los símbolos de rombo con color negro, los cuales, representa los valores donde $Ma=1$, que para el caso base sería la ubicación del Área crítica o mínima. Es importante resaltar que para la compresión de dichos fenómenos se tiene que tener muy claro el funcionamiento y conceptos expuestos en la figura 7.

Los cambios en los parámetros de entrada tienen tres efectos representativos:

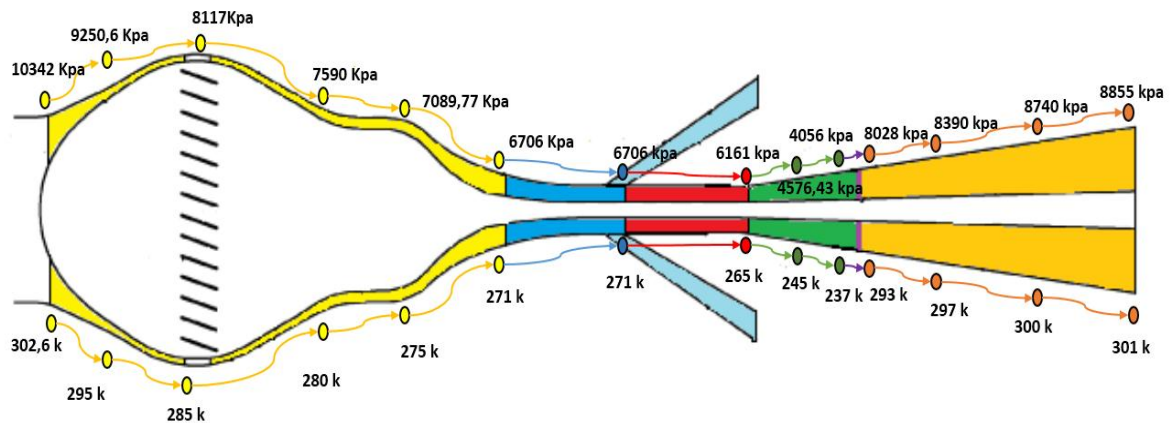
1. Hacen que el flujo de gas alcance un $Mach=1$ antes o después del A_c del diseño.
2. Provocan que la caída de presión y temperatura sea más rápida o más lenta.
3. Dado al enunciado 1 el gas puede sufrir efectos no deseados como: compresión o zigzaguo entre expansión o compresión.

❖ Para los casos donde el $Mach=1$ es alcanzado antes de del A_c (línea Verde figura 25) observamos que después del $Mach=1$ se presentan una zigzaguo entre expansión o compresión; esto se debe a que la geometría después $Mach=1$ es convergente con flujo $M>1$ por lo cual se presenta un compresión es decir el ducto actúa como un difusor, el gas disminuirá su velocidad, luego, que alcanza un $Ma<1$ se presenta una expansión por tener flujo subsónico con geometría convergente, el gas aumentara su velocidad hasta $Ma=1$ y así sucesivamente. Este fenómeno trascurrirá hasta donde esté ubicada el área crítica (A_c del caso base). Los valores de Presión, temperatura densidad, velocidad, C,H serán aproximadamente los obtenido en $Mach=1$, es por eso que lo considero como un efecto estabilizador.

❖ Para los casos donde $Ma=1$ es alcanzado después del A_c , lo que ocurre es que el gas no se expandirá lo suficiente para alcanzar un $Mach=1$, este caso es representado en la línea naranja figura 25. La velocidad de flujo será subsónica en todo momento y generalmente si el twister tiene diseñado una tobera convergente-divergente para expansión en el diseño original, este provocará una leve compresión en el gas luego de alcanzar la ubicación de A_c por tener flujo subsónico.

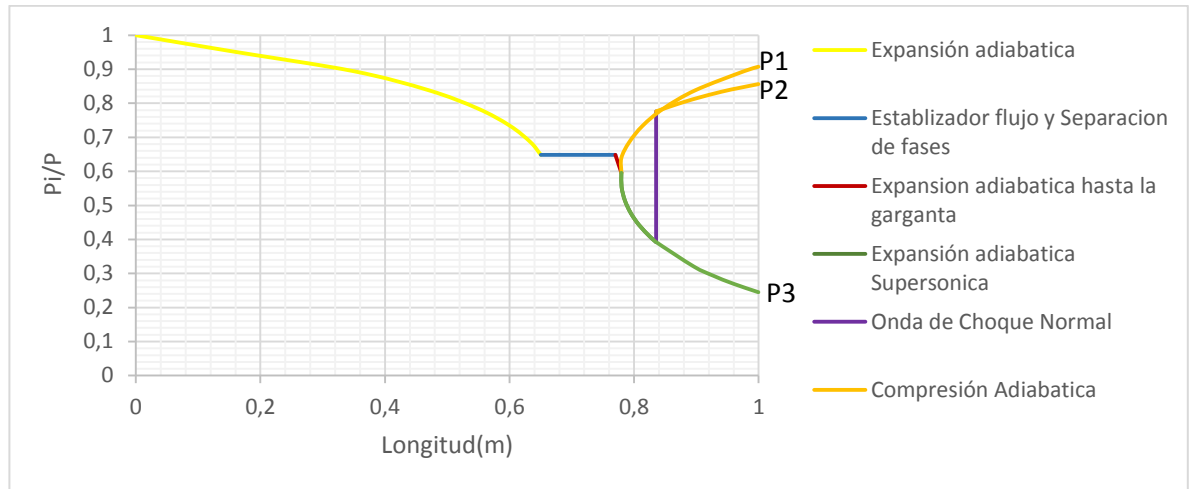
7.3.2 Cambios en la presión exterior del diseño. Para mostrar todos los posibles escenarios se realizó el diseño extra de un twister para alcanzar 6lb de h₂O/MMscf, mucho menor que el caso base. Este modelo nos permitirá observar con mayor detenimiento todos los cambios que puede sufrir el fenómeno de compresión dentro del equipo.

Figura 26. Diseño del Twister para obtener un contenido de 6lb/MMscf.



Fuente: Modificada por el autor, obtenida de: Betting, Marco, Tjeenk Willink, Cornelis Antonie, Van Bakel, Robert Petru. Multistage cyclonic fluid separator - AU2009339468. (En línea). (5 de enero de 2016). Disponible en <http://www.ipaustralia.com.au/applicant/twister-bv/patents/AU2009339468/>

Figura 27. Presión exterior del diseño.



Luego de llegar a la garganta las condiciones de operación fuera del Twister tendrán efectos sobre los parámetros de flujo y en algunos casos puede o no cambiar los fenómenos de compresión dentro del equipo; en la figura 27 apreciamos 3 escenarios en la cual la presión exterior afecta las condiciones de compresión.

Caso $P_{ext} = P_1$, en la cual luego de la garganta se presenta una compresión adiabática dado que no se presentan flujos supersónicos con número $Ma > 1$, es el proceso en el cual se presenta el máximo recobro de Presión que puede alcanzar el Twister diseñado con esta geometría, este proceso se caracteriza por tener en condiciones ideales $\Delta S = 0$ dado que no se presentan irreversibilidades por las ondas de choque.

Caso $P_{ext} = P_2$, representa el caso base del diseño; se puede observar la presencia de la onda de choque y el cambio en las condiciones de compresión con respecto a una expansión adiabática puesto que esta presenta $\frac{dP}{dL} \leq$ al del caso adiabático; esto se debe al aumento de entropía en la onda de choque.

Entre más avancemos en el valor de número mach o en la velocidad de flujo supersónico se presentaran irreversibilidades más fuertes, lo que conlleva a sacrificar un mayor porcentaje de presión en el proceso.

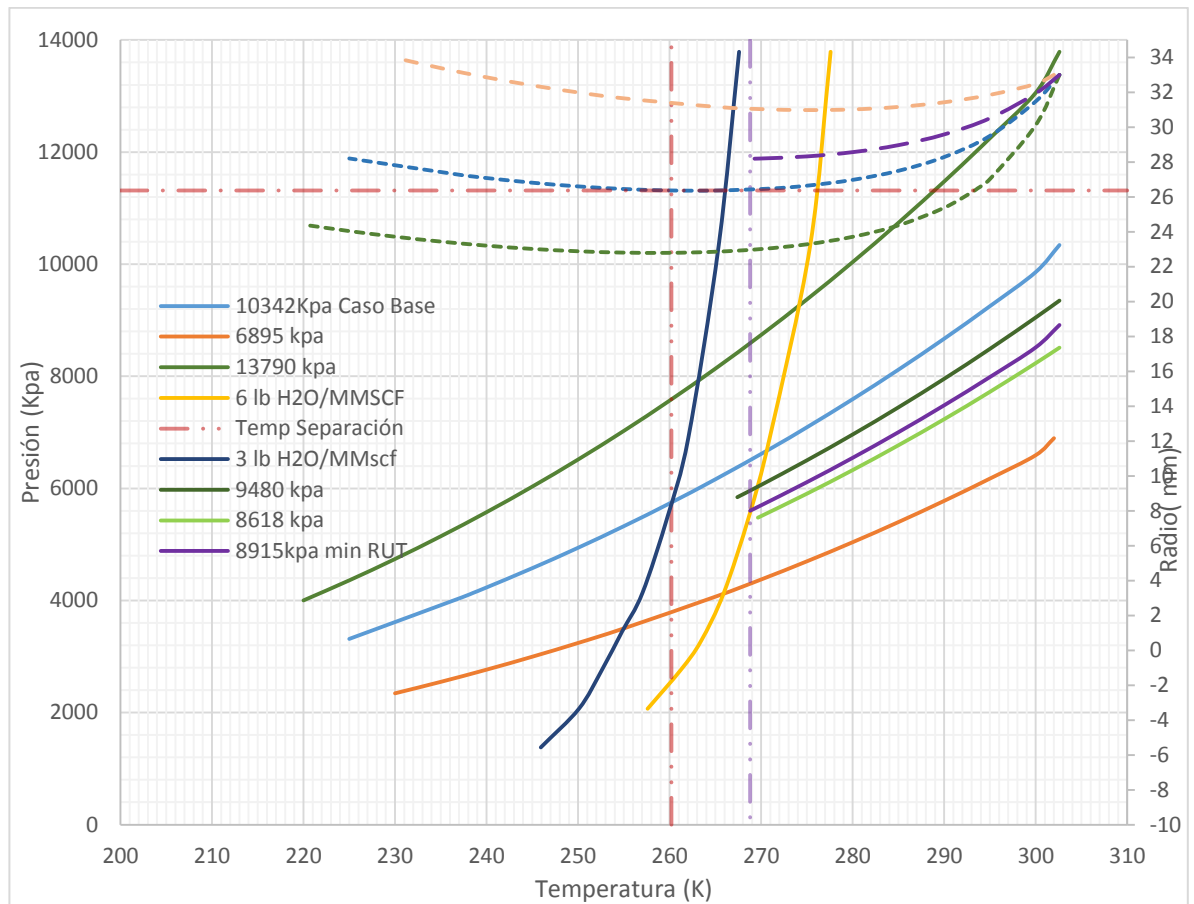
Caso $P_{ext} = P_3$ esta presión se presenta si las condiciones aguas abajo del twister son menores al valor y simboliza una expansión adiabática a velocidades supersónicas ($Ma \approx 1.7$), es decir en ningún momento se realiza una re compresión del gas dentro del separador supersónico.

7.3.3 Cambios de presión del gas en la boquilla de entrada

En las condiciones:

Caso	Presión (Kpa)	Presión(psi)
Caso base	10342,14	1500
Caso A	6895	1000
Caso B	13789,52	1500

Figura 28. Cambios en la presión en la boquilla de entrada del twister

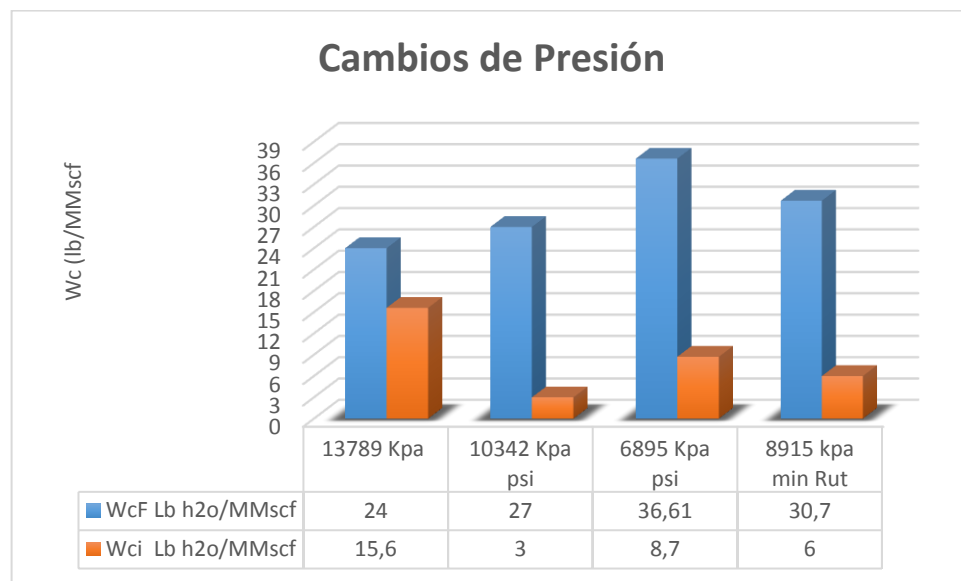


Los cambios en las condiciones de entrada afectaran de manera drástica el comportamiento del gas, por lo cual, la geometría establecida para el caso base no tendrá el mismo efecto sobre la eficiencia de separación y propiedades del fluido. La figura 28 representa los cambios de condición (P,T) y geometría al variar la presión en el sistema; en algunos casos se requerirá de mayor diferencia de geometría que otra para obtener el efecto deseado; por ejemplo, el gas en condiciones del caso A no requerirá un $R=26.32$ mm para lograr un $Mach=1$ sino mucho menos. En esa diferencia de geometría a la cual es sometido el fluido; provoca una intercalación entre expansión y compresión hasta el radio crítico del caso base debido a que el ducto se comportará como una tobera y un difusor, es

decir, las condiciones hasta $R=26.367$ mm serán aproximadamente las condiciones de P y T cuando $Mach=1$ en radio Rcr del caso A.

Por otra parte habrá condiciones donde sea requerido radio o áreas más pequeñas, donde se podrá cortar directamente en la gráfica RvsT (línea roja punteada) y luego saber en qué condición se encuentra el gas (P y T) subiendo verticalmente desde la línea punteada a la sólida del mismo color.

Figura 29. Contenido de agua en el gas vs cambios de presión en la boquilla de entrada.



Los cambios de presión en sistema provocan dos cosas; la primera una disminución o aumento de vapor de agua en el gas y segundo un efecto no deseado en la separación de fases; dado que el fluido no logra expandirse lo suficiente para alcanzar las condiciones deseadas, esto puede verse observado en la figura 29 donde refleja los contenidos de vapor de agua y gas al comenzar (Wci) y finalizar el proceso (Wcf).

Dado que la en la vida productiva de un pozo la presión va decayendo con el trascurso del tiempo, La presión mínima para estar al margen del RUT es 8915 kpa (1293 psi), En la cual obtendremos un gas seco con 6lb h2o/MMscfD, este caso puede ser observado siguiendo la líneas moradas en la figura 28.

7.3.4. Cambios en temperatura del gas en la boquilla de entrada.

Condiciones:

Caso	Temperatura (k)
Caso base	302.6
Caso C	308,15
Caso D	297,04

Figura 30. Cambios en la temperatura en la boquilla de entrada del Twister.

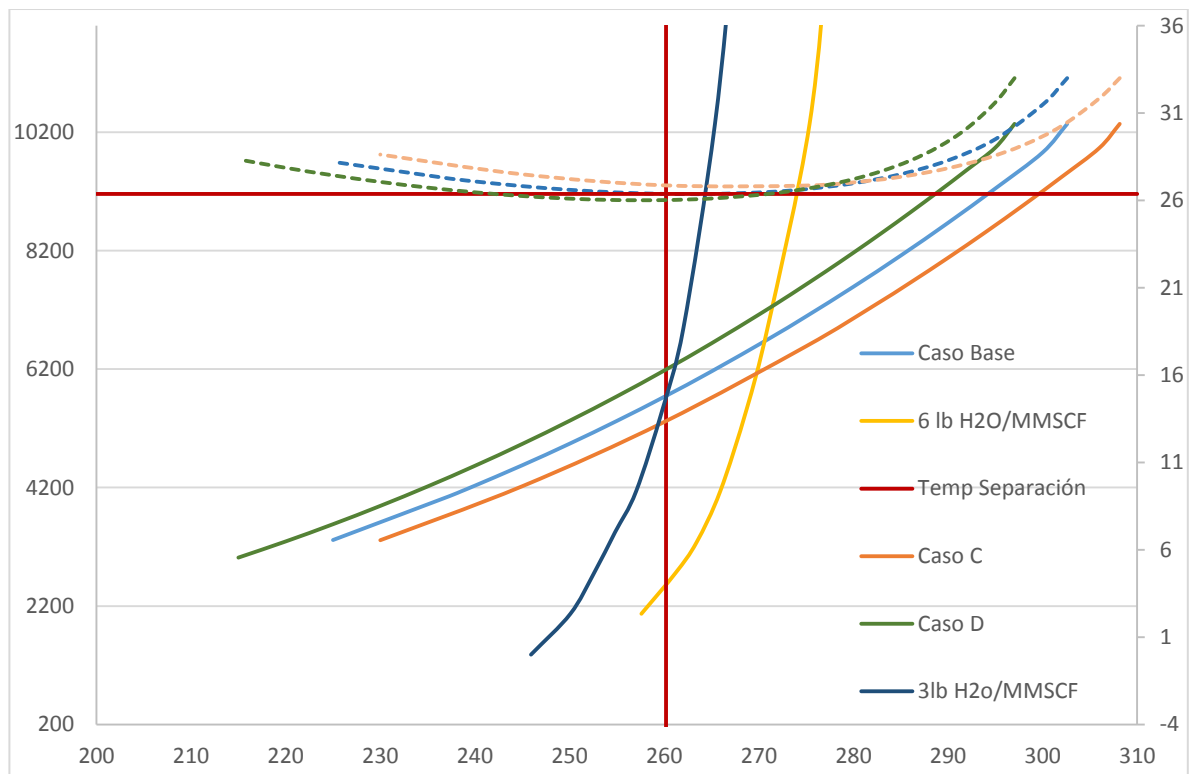
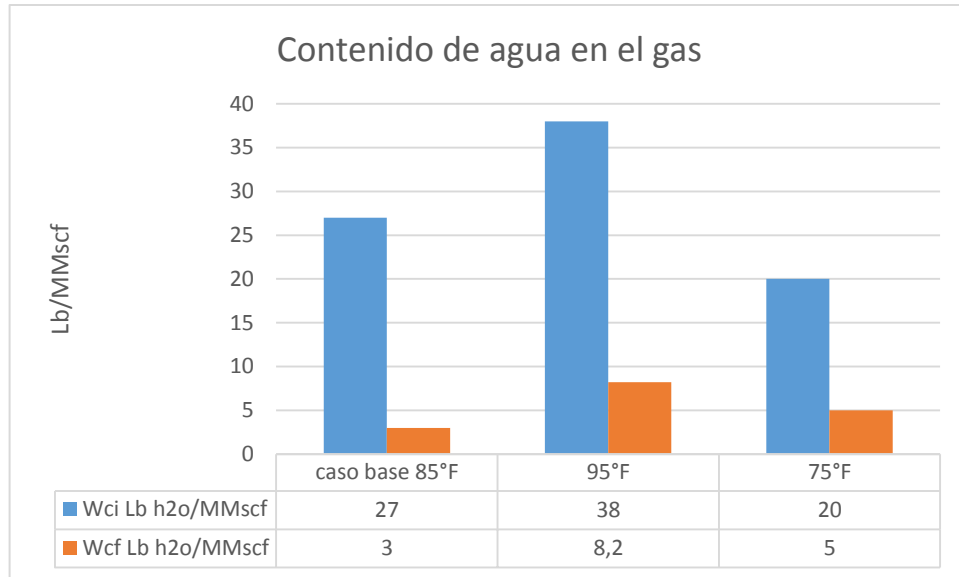


Figura 31. Contenido de agua en el gas vs cambios de temperatura en la boquilla de entrada.



Aumentar o disminuir la temperatura ocasiona un aumento de vapor de agua en el gas seco que sale del twister; esto es ocasionado porque al variar dicho parámetro estamos afectando la densidad, la velocidad del sonido (C_i), entropía entre otras propiedades termodinámicas. Estas variaciones provocan el gas tenga régimen de flujo diferentes y alcancen un $Ma=1$ antes o después del R_{cr} del caso base, lo cual, provocará que la geometría diseñada funcione como un estabilizador, una tobera o incluso como un difusor dependiendo de la velocidad de flujo alcanzada para cada caso.

7.3.4 Cambios de flujo de gas en el proceso.

Condiciones:

Caso	Flujo Másico (Kg/S)	Flujo Volumétrico (MMscfD)
Caso base	11.69	50
Caso E	9.35	40
Caso F	14.03	60

Figura 32. Cambios en flujo volumétrico del gas.

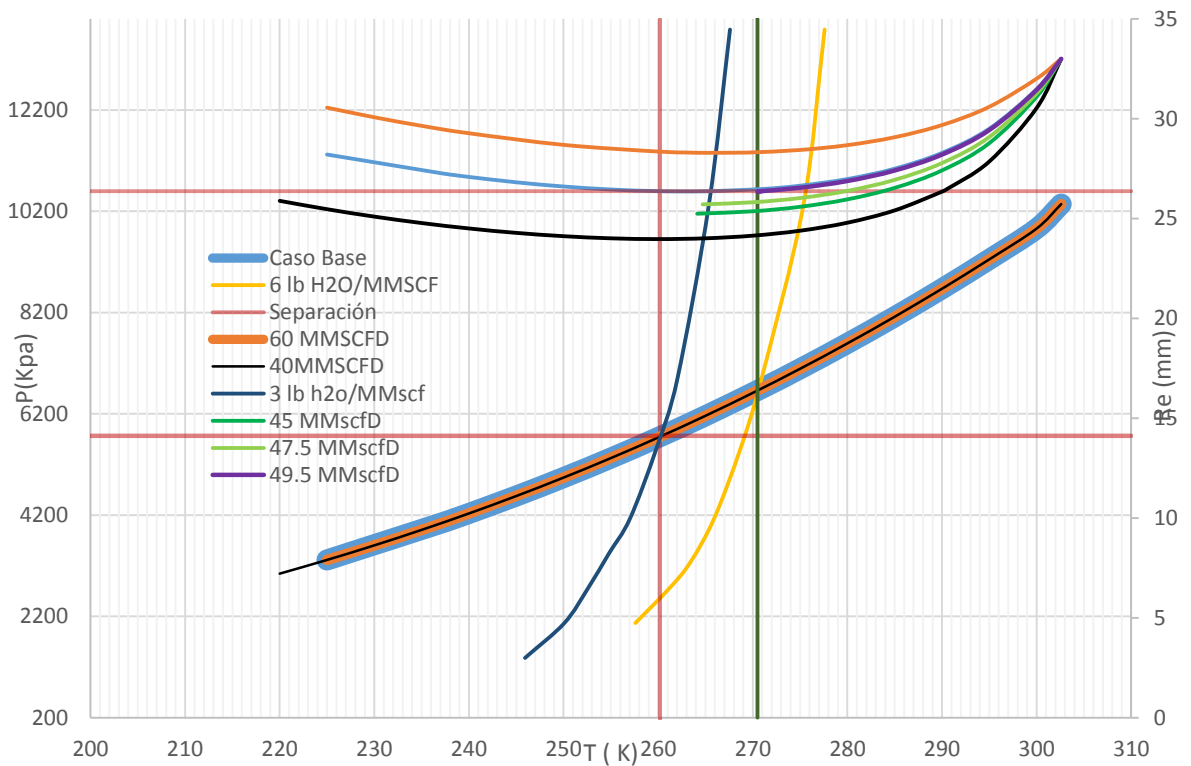
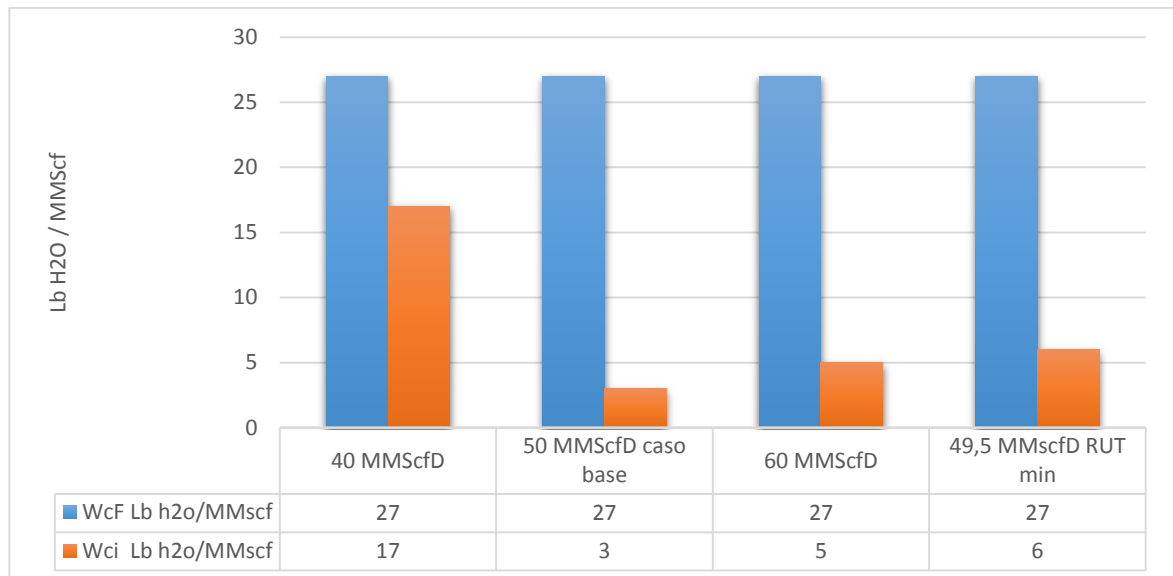


Figura 33. Contenido de agua en el gas vs cambios del flujo de gas.



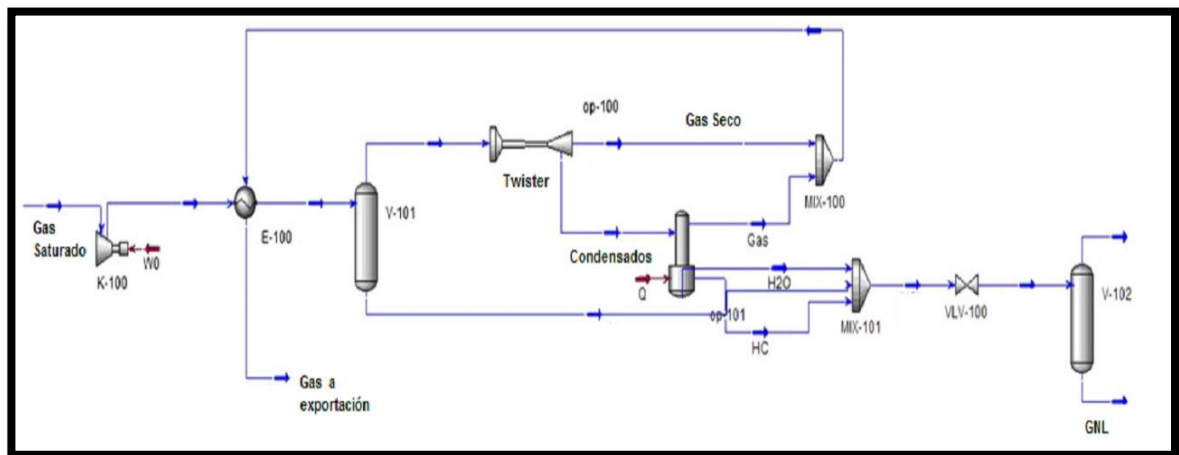
Podemos observar que en el twister, el proceso de expansión, es muy sensible a los cambios de flujo; disminuir o aumentar al flujo provoca un cambio en la velocidad del gas y el número mach, lo cual causa que el fluido alcance un $Ma=1$ antes o después del radio crítico del caso base, lo que ocurre es que para cada caso la geometría diseñada funcionará como un estabilizador, una tobera o incluso como un difusor dependiendo de la velocidad de flujo alcanzada.

En la figura 32. Apreciamos el fenómeno de expansión para diferentes valores de flujo, el caudal mínimo en cual se alcanza el valor máximo de contenido de agua (W_c) para el cumplimiento del RUT es de 11.57 kg/s (49.5 MMscf) para obtener el gas con un $W_c=6\text{lb H}_2\text{O/MMscf}$. La expansión de este gas puede observarse siguiendo las líneas moradas de la figura 32.

8. COSTO DE UNA PANTA USANDO LA TECNOLOGÍA TWISTER.

Los siguientes datos son tomados del artículo técnico: Supersonic separation in onshore natural gas dew point plant, Priscilla B. Machado, Juliana G.M. Monteiro, Jose L. Medeiros , Hugh D. Epsom , Ofelia Q.F. Araujo , 2012.

Figura 34. Esquema de la planta para control de punto de rocío y obtención GNL usando el separador supersónico Twister.



Fuente: Priscilla B. Machado, Juliana G.M. Monteiro , Jose L. Medeiros , Hugh D. Epsom y Ofelia Q.F. Araujo, "Supersonic separation in onshore natural gas dew point plant", Rio de janeiro Brazil, 2012 .

Tabla 3. Costo de una planta para control de punto de rocío y obtención GNL usando el separador supersónico Twister.

Equipo	nomenclatura	Costo(USD)
Separador	v-101	\$ 1.033.015,00
Separador (Estabilizador)	v-102	\$ 12.739,00
Controladores		\$ 481.328,00
Compresor, bombas y turbinas	k-100	\$ 2.499.121,00

Equipo	nomenclatura	Costo(USD)
Intercambiador de calor	E-100	\$ 1.160.607,00
Twister	Op-100	\$ 3.430.000,00
Separador Hidratos	Op-101	\$ 1.430.000,00
	total	\$ 10.046.810,00
CAPEX		\$ 17.782.854,00
		USD/año
OPEX		\$ 210.370.247,00

Fuente: Priscilla B. Machado, Juliana G.M. Monteiro , Jose L. Medeiros , Hugh D. Epsom y Ofelia Q.F. Araujo, "Supersonic separation in onshore natural gas dew point plant", Rio de janeiro Brazil, 2012 .

9. CONCLUSIONES

El Twister demuestra ser un equipo viable para refinación del gas natural en cuanto sus consideraciones técnicas, este estudio demuestra el potencial y eficiencia del separador supersónico, el cual está basado en las condiciones de presión y temperatura que pueda alcanzar el fluido al fluir dentro de este, este proyecto representa una base para el estudio de dicho equipo, como también, el estudio de las propiedades termodinámicas del gas.

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten expresar las siguientes conclusiones:

- ❖ Se logró crear una metodología o procedimiento que describiera las fluctuaciones de las propiedades termodinámicas del gas al fluir por un separador supersónico Twister.
- ❖ Dado el gran potencial del equipo, no solo se puede lograr la deshidratación del gas natural, se demostró también que se pueden alcanzar condiciones de presión y temperaturas bajas, para poder entrar en la envolvente de fases y obtener hidrocarburos condensados del gas (GLP).
- ❖ La clave del twister está en alcanzar velocidades supersónicas, entre mayor sea la velocidad de flujo del gas en el punto de separación, mayor será la cantidad de condensados que se puede obtener de este, sin embargo, al ir más rápido se sacrificará presión de salida en el equipo, debido a la generación de ondas de choque de mayor intensidad.

- ❖ la sensibilidad de los parámetros de flujo a la entrada del twister demuestra que las variaciones de temperatura, presión y caudal tienen un efecto adverso en la calidad del gas obtenido, dado esto, se recomienda utilizar equipos complementarios como válvulas, compresores, separadores e inclusive tener en cuenta IPR del pozo de gas para que permanezcan estáticas, sin embargo, hay ciertos rangos de estos parámetros en el que Twister puede tratar un gas cumpliendo reglamentación o RUT.
- ❖ En cuanto a su geometría se establece que gracias a que a velocidades supersónicas el fluido se expande con $\frac{dA}{dL} > 0$ no se necesitara áreas más pequeñas que la garganta para obtener las condiciones objetivos, lo que resume que su uso solo estará limitado a que se acepten las pérdidas de presión a la salida del equipo.
- ❖ Debido a que la eficiencia del twister solo depende del diseño y su geometría para el gas a tratar, se descarta el uso de altas dosis químicos y obtención residuos durante el proceso, lo que permite argumentar que el twister es una opción amigable para el medio ambiente.

10. RECOMENDACIONES

Debido a que complejo cambio en las propiedades termodinámicas del gas real son difícil de determinar para una mezcla en concreta, este trabajo incentiva a usar simuladores numéricos de flujo para profundizar en el tema y obtener valores más exactos.

Se recomienda profundizar en el estudio del giro de los alabes o guías, en el efecto de ondas de choque en hidrocarburos, en el fenómeno de endulzamiento y control de punto de rocío del gas natural usando la tecnología twister.

BIBLIOGRAFÍA

ANAHID Karimi , MAJID dinzadegan Abdi “Selective dehydration of high-pressure natural gas using supersonic nozzles”, Canadá, 2008.

Betting, Marco, Tjeenk Willink, Cornelis Antonie, Van Bakel, Robert Petru. Multistage cyclonic fluid separator - AU2009339468, 5 de enero de 2016.

CAMPBELL, Jhon Gas conditioning and processing. Library of congress catalog card. Oklahoma: Campbel petroleum series, 1992. Vol 1.

CENGEL Yunes A, BOLES Michael A, Termodinámica séptima edición, MC Graw Hill, 2011.

CHUANG Wen, XUEWEN Cao [↑] , YAN Yang, JING Zhang, “Evaluation of natural gas dehydration in supersonic swirling separators applying the Discrete Particle Method”, Department of Oil and Gas Engineering, China University of Petroleum, China, 2011.

EPSOM, H, Supersonic Gas conditioning-Low Pressure Drop, OTC 17884. 2006.

EPSOM, H. How does Twister work. Twister BV. 2007.

EPSOM, H. Twister Technology Development Twister BV. 2009.

GONZALEZ Nathalia y BEJARANO Alíed, Análisis de los parámetros de flujo de una corriente de gas a través de un separador supersónico twister, Bucaramanga, 2012.

GUEVARA LUNA, Marco Andrés, “Diseño de un equipo de recuperación de líquidos de gas natural empleando CFD”, Bogotá D.C, Colombia 2015.

MACHADO Priscilla B., MONTEIRO Juliana G.M., MEDEIROS Jose L., EPSOM Hugh D. y ARAUJO Ofelia Q.F., “Supersonic separation in onshore natural gas dew point plant”, Rio de Janeiro Brazil, 2012 .

MARTÍNEZ DE LA CALLE, Julián. “Apuntes de Mecánica de Fluidos: 2ª parte . Flujo compresible”. Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Gijón. Universidad de Oviedo, 2016

National advisory committee for aeronautics, report 1135, equations, tables, and charts for compressible flow by ames research staff, año 1953

P. SCHINKELSHOEK AND H.EPSON, TWISTER B.V. “Supersonic Gas, Conditioning. Low Pressure Drop for NGL Recovery “OTC 17884. Año 2006.

PRAST Bart, LAMMERS Bart and BETTING Marco, Twister BV . “CFD FOR SUPERSONIC GAS PROCESSING”. NETHERLANDS, Diciembre 2006.

R AHMAD SAMAWA, KROSTANI, A.Mohd Jalil,M. Esa, N. Othman, Petronas. “Concept Proofing od supersonic Nozzle Separatr for CO2 separation from natural gas using a flow loop”, Malasia, Marzo 2014.

Res. 054 de 2007. (2007). Comisión de Regulación de Energía y Gas. Min. De Minas y Energía.