

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE GAS



**“EVALUACIÓN DEL PROCESO DE ACONDICIONAMIENTO DEL GAS
COMBUSTIBLE DE LA PLANTA DE INYECCIÓN DE GAS A ALTA
PRESIÓN PIGAP I”**

REALIZADO POR:

ING. M.SC. FERNANDO JOSE CEDEÑO SANTOYO

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO
PARCIAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE ESPECIALISTA EN

INGENIERÍA DE GAS

Barcelona, Octubre de 2009

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA



**“EVALUACIÓN DEL PROCESO DE ACONDICIONAMIENTO DEL GAS
COMBUSTIBLE DE LA PLANTA DE INYECCIÓN DE GAS A ALTA
PRESIÓN PIGAP I”**

ASESORES

Ing. Orlando M. Ayala H, M.Sc.
Asesor Académico

Ing. Especialista Marilyn Aguilera
Asesor Industrial

Barcelona, Octubre de 2009

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA



**“EVALUACIÓN DEL PROCESO DE ACONDICIONAMIENTO DEL GAS
COMBUSTIBLE DE LA PLANTA DE INYECCIÓN DE GAS A ALTA
PRESIÓN PIGAP I”**

Ing. Orlando M. Ayala H, M.Sc.
Asesor Académico

Ing. Orlando F. Ayala R., M.Sc.
Jurado Principal

Ing. Jesús Moreno, M.Sc.
Jurado Principal

Barcelona, Octubre de 2009

ARTÍCULO 44

DE ACUERDO AL ARTÍCULO 44 DEL REGLAMENTO DE TRABAJO DE GRADO:

“LOS TRABAJOS DE GRADO SON DE EXCLUSIVA PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE Y SOLO PODRÁN SER UTILIZADOS A OTROS FINES CON EL CONSENTIMIENTO DEL CONSEJO DE NÚCLEO RESPECTIVO, QUIEN LO PARTICIPARÁ AL CONSEJO UNIVERSITARIO”.

DEDICATORIA

A mi hija Pahola Esthefanía
A mi hijo Fernando Sebastián
A mi tío Alfonso Perdomo

AGRADECIMIENTO

A las personas que han hecho posible este logro:

A mi familia

A mi angelito

Al personal de PDVSA

A Dios Todopoderoso

Al Sagrado Corazón de Jesús

RESUMEN

La presente investigación tuvo como propósito evaluar el proceso de acondicionamiento del gas combustible de la Planta PIGAP I. En cuanto a la metodología de la investigación fue de tipo documental y de campo, con un nivel descriptivo. Los objetivos específicos consistieron en analizar el proceso de tratamiento actual del gas combustible de la Planta de Inyección de Gas de Alta Presión PIGAP I, la construcción del proceso en el simulador HYSYS bajo las condiciones de diseño original de la planta (caso diseño), analizar el sistema de gas combustible bajo las condiciones actuales de operación en el simulador HYSYS (caso operación actual), establecer las variables críticas del proceso e identificar mejoras en el sistema de gas combustible para cumplir con las especificaciones del fabricante. De acuerdo al desarrollo de la investigación se evaluaron diferentes escenarios en función a las fuentes de alimentación del gas combustible (Deshidratación Santa Bárbara y Deshidratación de Alta Presión), planteando posibles escenarios de operación del sistema con los cuales se trató de establecer las posibles causas que afectan el desempeño de los patines de acondicionamiento del gas combustible, ya que los mismos no son capaces de entregar el gas de acuerdo con las especificaciones del fabricante. Determinándose que se deben evaluar tanto la temperatura producto de la expansión de las válvulas PCV-12033A/B como la incorporación de un calentador adicional para lograr las condiciones óptimas de operación de los turbocompresores.

CONTENIDO

ARTÍCULO 44	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
RESUMEN.....	vii
CONTENIDO	viii
LISTA DE TABLAS	xii
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
CAPITULO I.....	15
INTRODUCCIÓN	15
1.1 Planteamiento del problema.....	17
1.2 Objetivos	20
1.2.1 Objetivo general.....	20
1.2.2 Objetivos específicos	20
1.3. Importancia	21
CAPITULO II	10
MARCO TEÓRICO.....	10
2.1 Antecedentes	10
2.2. Descripción general del área en estudio.....	12
2.3. Bases teóricas.....	15
2.3.1 Gas Natural.....	15
2.3.2. Propiedades y Comportamiento del Gas Natural.....	15
2.3.3.1. Peso molecular del gas, PM	16
2.3.3.2. Gravedad específica, γ_g	17
2.3.3.3. Densidad del gas, ρ_g	18
2.3.3.4. Volumen específico, v	19
2.3.3.5. Factor de compresibilidad, Z	19

2.3.3.6. Viscosidad del gas, μ_g	21
2.3.4 Contenido de agua en el Gas Natural.....	22
2.3.5. Hidratos.....	25
2.3.6. Diagrama de Fases	26
2.3.6. Cromatografía de Gases	28
2.3.7. Turbocompresores.....	29
2.3.8. Turbinas	29
2.3.8.1. Turbinas a gas	29
2.3.8.2. Turbina de gas de ciclo abierto	30
2.3.8.3. Ciclo termodinámico de las turbinas de gas.....	31
2.3.9. Turbina de Gas Nuovo Pignone modelo MS5002C.....	33
2.3.9.1. Funcionamiento de la turbina de gas modelo MS5002.....	34
2.3.10. Sistema de gas combustible	36
2.3.10.1. Elementos que conforman un sistema de gas combustible.....	36
2.3.11. Simulación de procesos.....	38
2.3.12. Simulador HYSYS	39
CAPITULO III.....	40
MARCO METODOLÓGICO.....	40
3.1. Tipo de investigación	40
3.2 Nivel de la investigación.....	41
3.3 Universo o población	41
3.4 Área de investigación.....	42
3.5 Fuentes de información.....	42
3.5.1 Fuentes de información primarias.....	43
3.5.2 Fuentes de información secundarias	43
3.6 Técnicas e instrumentos de recolección de información.....	43
3.7. Procedimiento metodológico	45
3.7.1 Etapa I: Recopilación de la información.....	45

3.7.2 Etapa II: Descripción y análisis del proceso de tratamiento del gas combustible.	45
3.7.3 Etapa III: Construcción del proceso en el simulador HYSYS bajo las condiciones de diseño original de la planta.	46
3.7.4 Etapa IV: Análisis del sistema de gas combustible bajo las condiciones actuales de operación en el simulador HYSYS.....	46
3.7.5 Etapa V: Establecer las variables críticas del proceso.	46
3.7.6 Etapa VI: Identificación de mejoras en el sistema de gas combustible para cumplir con las especificaciones del fabricante.....	47
3.8. Técnicas de análisis de la información.....	47
3.9. Tratamiento de la información.....	47
CAPITULO IV.....	49
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	49
4.1. Análisis del proceso actual de operación del sistema de gas combustible de la planta de inyección de gas a alta presión PIGAP I.....	49
4.1.1. Funcionamiento del patín de acondicionamiento de gas combustible.....	49
4.1.2. Especificaciones de los equipos asociados al patín de gas combustible..	54
4.2. Construcción del proceso de acondicionamiento del gas combustible para el caso diseño en el simulador HYSYS (caso diseño).....	55
4.3. Análisis del sistema de gas combustible bajo las condiciones actuales de operación en el simulador HYSYS (caso operación actual).....	59
4.4. Establecer las variables críticas del proceso de acondicionamiento del gas combustible.....	64
4.4.1. Escenario 1. Sistema de gas combustible con fuente de alimentación Deshidratación Santa Bárbara a 7722,1 kPa (1120 Psig) y 299,81 K (80 °F). ...	69
4.4.2. Escenario 2. Sistema de gas combustible con fuente de alimentación Deshidratación PIGAP I a 7722,1 kPa (1120 Psig) y 324,26 K (124 °F).....	71
4.4.3. Escenario 3. Sistema de gas combustible con fuente de alimentación mezcla actual a 7722 kPa (1120 Psig) y 310,9 K (100 °F).	75

4.5. Identificación de mejoras en el sistema de gas combustible para cumplir con las especificaciones del fabricante	78
CAPITULO V	81
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	81
5.1. Conclusiones	81
5.2. Recomendaciones.....	82
BIBLIOGRAFÍA	84
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO.....	86

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones del gas de alimentación para el caso diseño.....	55
Tabla 2. Cromatografía del gas de alimentación para el caso diseño (componentes en % Molar).	56
Tabla 3. Especificaciones del gas de alimentación para el caso operación actual.	60
Tabla 4. Cromatografía del gas de alimentación para el caso operación actual (componentes en % Molar).	60
Tabla 5. Condiciones de operación para el caso diseño vs. actual.....	63
Tabla 6. Comportamiento de Presión y Temperatura a la entrada del patín de acondicionamiento de gas para el mes de Marzo del 2009.	66
Tabla 8. Especificaciones del gas de alimentación del escenario 1.	69
Tabla 9. Especificaciones del gas de alimentación del escenario 2.	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquemático fuentes de suministro de gas combustible de PIGAP I. Tomado de “Memoria Descriptiva PIGAP I”.....	18
Figura 2.1. Esquemático de operación Complejo Muscar.	12
Figura 2.2. Esquemático de accionamiento (turbina) y de un tren de compresión PIGAP I. Tomado de “Memoria Descriptiva PIGAP I”.....	13
Figura 2.3. Esquemático de compresión interetapas PIGAP I. Tomado de “Memoria Descriptiva PIGAP I”.....	14
Figura 2.4. Factor de compresibilidad (Z) para el gas natural. Tomado de GPSA (vol. 2, p. 23-12).....	22
Figura 2.5. Contenido de agua en los hidrocarburos gaseosos. Tomado de GPSA (vol. 2, p. 20-4).....	24
Figura 2.6. Diagrama de Fases Típico. Tomado de Campbell, J. (vol. 1, p. 96).	26
Figura 2.7. Envoltentes Típicas de Fases. Tomado de Campbell, J. (vol. 1, p. 98)..	28
Figura 2.8. Turbina a Gas Modelo Mars. (Fuente Solar Turbines).....	30
Figura 2.9. Ciclo Brayton, en su modalidad de ciclo abierto, para una turbina de eje simple. Tomado de Lecuona, A. (p. 29).....	32
Figura 2.10. Ciclo termodinámico básico de las turbinas de gas, diagramas P-v y T-s. Tomado de Wikipedia.	33
Figura 2.11. Modelo de un turbocompresor de dos ejes. Tomado de Nuovo Pignone (Vol. 1, p. 1-7).....	34
Figura 4.1. Esquemático del patín de Acondicionamiento de gas combustible (SK-1207) de PIGAP I. (fuente PDVSA).....	50
Figura 4.2. Modelo de simulación del patín de Acondicionamiento de gas combustible (SK-1207) de PIGAP I, Caso Diseño.	57
Figura 4.3. Envoltente de fase corriente 9 (Alimentación de la Cámara de Combustión), Caso Diseño.	58

Figura 4.4. Modelo de simulación del patín de Acondicionamiento de gas combustible (SK-1207) de PIGAP I, Caso operación actual.	62
Figura 4.5. Envolverte de fase corriente 9 (Alimentación de la Cámara de Combustión), Caso operación actual.	63
Figura 4.6. Modelo de simulación del Escenario 1.....	70
Figura 4.7. Envolverte de fase corriente 9 (Alimentación de la Cámara de Combustión), Escenario 1.	71
Figura 4.8. Modelo de simulación del Escenario 2.....	73
Figura 4.9. Envolverte de fase corriente 9 (Alimentación de la Cámara de Combustión), Escenario 2.	74
Figura 4.10. Modelo de simulación del Escenario 3.....	76
Figura 4.11. Envolverte de fase corriente 9 (Alimentación de la Cámara de Combustión), Escenario 3.	77
Figura 4.12. Modelo de simulación, mejoras al sistema caso 1.....	79
Figura 4.13. Modelo de simulación, mejoras al sistema caso 2.....	80

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

La Planta de Inyección de Gas a Alta Presión PIGAP I, es la encargada de incrementar la presión del gas de 7584,2 kPa (1100 psig) hasta 62053 kPa (9000 psig) a través cinco trenes de turbocompresión a razón de 59 m³/s (180 MMPCND). Con la inyección de estos volúmenes se garantiza las presiones de fondo del Yacimiento Carito, disminuyendo los problemas de taponamiento por precipitación de asfaltenos, así como el aseguramiento de los factores de recobro en la explotación del crudo.

Cada sistema de turbocompresión viene equipado con sistemas auxiliares tales como el de acondicionamiento de gas combustible, objeto del presente estudio. Este ha venido presentando fallas en su operación por cuanto la fuente de suministro de gas combustible fue modificada, ingresando al patín fuera de las especificaciones del fabricante, lo que afecta el rendimiento de los turbocompresores.

El presente estudio se basa en proponer la o las alternativas que permitan una operación óptima del sistema de gas combustible de PIGAP I, a fin de garantizar la continuidad operacional de los turbocompresores. Para lograr esto, se efectuará una investigación de tipo descriptiva; debido a las limitaciones surgidas de los pocos estudios realizados en PDVSA sobre este tema.

Así mismo, el proyecto de investigación está estructurado en cinco (5) capítulos constituidos de la manera siguiente:

El Capítulo I, El problema, contiene el planteamiento, formulación y sistematización de la situación objeto de estudio. El objetivo general, los objetivos específicos y la importancia de la investigación.

El Capítulo II, Marco Teórico, establece el con qué se realizará el estudio y abarca la parte correspondiente a los antecedentes de la investigación, las bases teóricas y el marco conceptual.

El Capítulo III, Marco Metodológico, se define el tipo de investigación, las variables, su definición y los indicadores que permitirán su medición, la población, los instrumentos de recolección y análisis de la información además del diseño de la investigación, dando respuesta a la interrogante de cómo se realizará el estudio.

El Capítulo IV, Análisis de los Resultados, contiene la información recabada durante el desarrollo de la investigación. Para ello se toma como punto de partida el reporte de fallas en el programa CENTINELA en donde se verifica que el sistema de acondicionamiento de gas combustible no está operando de forma eficiente, ocasionando paros en los turbocompresores.

El Capítulo V, Conclusiones y Recomendaciones, en este punto de la investigación, una vez tomada y desarrollada la información, se estudia y analiza la misma, para finalmente hacer el diagnóstico que permita describir las recomendaciones, que pueden ser tomadas como base para la toma de decisiones de la organización en estudio.

1.1 Planteamiento del problema

El Complejo Operativo Muscar (COM) sirve de centro de acopio y recolección del gas producido principalmente por los yacimientos Carito, Pirital y Furrial del Distrito Norte de PDVSA. Dentro de las instalaciones del COM se encuentra la Planta de Inyección de Gas de Alta Presión I (PIGAP I), cuyo objetivo es comprimir el gas proveniente de las estaciones de flujo Tejero y Amana, así como del gas proveniente de la Planta de Extracción Santa Bárbara. Este flujo entra a un cabezal de succión, con una presión de 8273,7 kPa (1120 psig), dividiéndose hacia los cinco trenes de compresión, los cuales incrementan la presión hasta 62053 kPa (9000 psig), con un volumen de gas a manejar de 59 m³/s (180 MMPCND) por cada tren, para luego ser inyectados a los yacimientos en lo que se denomina proceso de recuperación secundaria de crudo.

Cada tren de compresión de PIGAP I está compuesto principalmente por:

- Turbinas de gas modelo MS 5002C.
- Caja incrementadora de velocidad.
- Compresores centrífugos.
- Sistemas auxiliares (Arranque, gas combustible, lubricación, entre otros).

Las fuentes de suministro para el sistema de gas combustible son el gas que es desviado de PIGAP I (proveniente del proceso de deshidratación de esta planta, gasoducto de 0,762 m (30 pulg.)), cuyas condiciones de presión son 8273,7 kPa (1120 psig) y el gas de retorno de la Planta de Extracción Santa Bárbara por los gasoducto de 0,4064 m (16 pulg.) de igual forma a 8273,7 kPa (1120 psig) (véase figura 1.1).

La Planta de Inyección de Gas de Alta Presión I (PIGAP I) cuenta con sendos patines de acondicionamiento (SK-1207, 1307, 1407, 1507, 1607), para el gas combustible requeridos por cada tren de compresión (MQ 1, 2, 3, 4 y 5). En total el sistema fue diseñado para manejar 2,294 m³/s (7 MMPCND) para cada tren siendo el volumen total a manejar por los sistemas de acondicionamiento de gas combustible que requieren los turbocompresores de 11,47 m³/s (35 MMPCND).

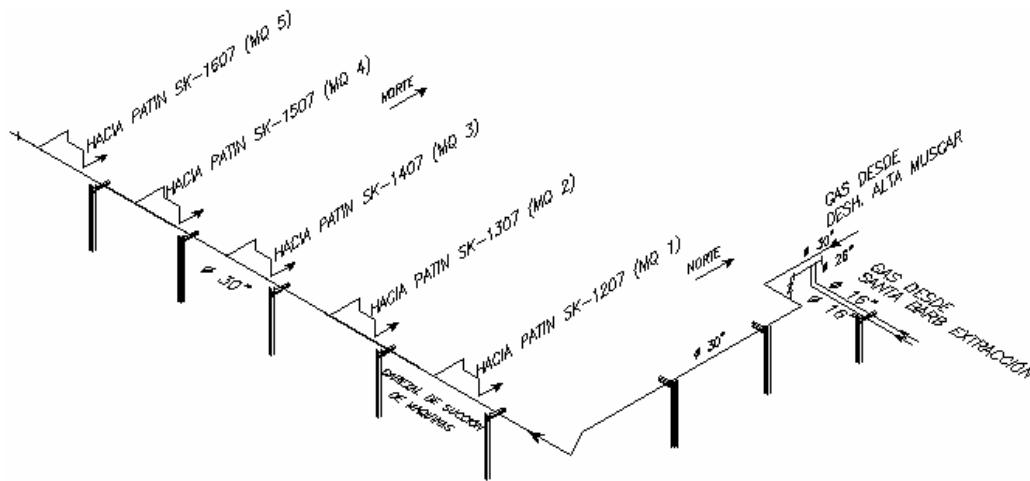


Figura 1. Diagrama de flujo de gas.

Por diseño la fuente de gas combustible y el gas de proceso son los mismos. Inicialmente fue establecida como el gas proveniente del sistema de deshidratación de la Planta Compresora PIGAP I, para ello el gas debía contener un máximo de 2,268 Kg de agua por cada m³/s de gas (5lb de agua/MMPCND), una temperatura de 324,26 K (124 °F) y estar en la zona de gas de la envolvente para evitar condensación al ser expandido. Sin embargo, posteriormente se adicionó el gas proveniente de deshidratación de la Planta de Extracción Santa Bárbara (PESB), como segunda fuente de gas combustible. Por lo que actualmente esta mezcla se compone de un 40% proveniente de PIGAP I y el 60% restante de PESB.

La fuente de la Planta de Extracción Santa Bárbara ocasiona que la temperatura de llegada a los patines varíe entre 292,6 K (67 °F) hasta los 310,92 K (100 °F), por lo que al ser expandidos en las válvulas reguladoras de presión (proceso Joule-Tomphson) desde 7584,2 kPa (1100 psig) hasta 1861,6 kPa (270 psig) se genera un descenso de la temperatura por debajo de la temperatura de solidificación del agua (273,15 K (32 °F)) contenida en el aire circundante a las tuberías (vapor de agua), presentándose por tanto formación de hielo en las líneas (tuberías) y actuadores de las válvulas. Al quedar estas válvulas sin control se presenta una mayor formación de líquidos, ocasionando paros por alto nivel de líquidos en el depurador. Por otra parte, esta formación de líquidos en el sistema ocasiona mayores caídas de presión en la succión del sistema de gas combustible que alimenta la cámara de combustión de las turbinas; disparando los sistemas de protección de los turbocompresores por baja presión.

Adicionalmente se tiene fuera de servicio los calentadores de gas combustible, ubicado luego de las válvulas de control (expansión), por lo que el gas que entra a las cámaras de combustión de las turbinas no alcanza la temperatura adecuada para la correcta combustión y por consiguiente afectando el funcionamiento de los turbocompresores.

Esta problemática ha ocasionado paros en las turbinas y por consiguiente en los trenes de compresión.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar e identificar las mejoras necesarias en el sistema de acondicionamiento del gas combustible de la Planta Compresora de Alta Presión (PIGAP I), y proponer un proceso que garantice las especificaciones requeridas por el fabricante de los turbocompresores de la Planta, en función a las condiciones del gas de alimentación.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Analizar el proceso de tratamiento actual del gas combustible de la Planta de Inyección de Gas de Alta Presión PIGAP I.
2. Construir el proceso en el simulador HYSYS bajo las condiciones de diseño original de la planta (caso diseño).
3. Analizar el sistema de gas combustible bajo las condiciones actuales de operación en el simulador HYSYS (caso operación actual).
4. Establecer las variables críticas del proceso.
5. Identificar mejoras en el sistema de gas combustible para cumplir con las especificaciones del fabricante

1.3. Importancia

La Planta de Inyección de Gas a Alta Presión PIGAP I, fue diseñada para incrementar la presión del gas de 7584,2 kPa (1100 psig) hasta 62053 kPa (9000 psig) a través de un proceso interetapas con un volumen a manejar de 59 m³/s (180 MMPCND) por cada uno de sus cinco trenes. Finalmente distribuidos en seis (6) macollas que surten a diecisiete (17) pozos inyectoros ubicados en el Yacimiento Carito. Con la inyección de estos volúmenes se garantiza las presiones de fondo de este yacimiento, disminución de los problemas de taponamiento por precipitación de asfaltenos, así como el aseguramiento de los factores de recobro en la explotación del crudo de este, elemento fundamental en la generación de riquezas para el País.

El presente estudio se basa en proponer la o las alternativas que permitan una operación óptima del sistema de gas combustible de PIGAP I, evitando un mayor consumo energético de las turbinas producto del aprovechamiento incompleto del poder calorífico del gas combustible, así como de minimizar los paros de planta y garantizando la continuidad operacional de los turbocompresores.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

En el 2002, el departamento de Ingeniería de Instalaciones de PDVSA realizó un informe técnico titulado: “Mejoras y Confibialidad Operacional Turbomáquinas Punta de Mata, Sistema de Gas Combustible Planta Compresora Muscar” [1].

En resumen el objetivo del informe era “Evaluar la actual y otras corrientes de gas como posibles fuentes de gas combustible y de arranque de la Planta Compresora Muscar, detectar desviaciones y definir esquemas de procesos de acondicionamiento de gas y las modificaciones necesarias en la infraestructura existente a fin de incrementar la disponibilidad de la planta mediante el acondicionamiento del gas combustible a las especificaciones requeridas por el fabricante de las turbinas”.

El estudio analizó tres fuentes de gas combustible: a) La succión del compresor en el nivel de 3102,6 kPa (450 psig), la cual era la única fuente utilizada, b) El gas de descarga de los compresores de Muscar a 8273,7 kPa (1200 psig); y c) El gas de 8273,7 kPa (1200 psig) proveniente de los separadores gas-crudo de alta presión de las estaciones de flujo Tejero y Santa Bárbara.

El informe concluyó que utilizando la fuente de 3102,6 kPa (450 psig), la condensación de líquido es producto de las condiciones de hidráulica del sistema así como a las propias características del gas por ser este rico.

El estudio no consideró el uso del gas residual de la Planta de extracción Santa Bárbara.

En el 2004, el departamento de Ingeniería de Desarrollo y Optimización de Infraestructura de PDVSA realizó un informe técnico titulado: “Identificación de Mejoras del Sistema de Gas Combustible del Complejo Operativo Muscar” [2].

En resumen el objetivo era “Incrementar la disponibilidad de la Planta Compresora Muscar, eliminando problemas asociados al Sistema de Gas Combustible y/o Arranque, definiendo las modificaciones necesarias en el sistema existente, como etapa de mejoramiento de infraestructura, de tal forma que acondicione las fuentes de gas a las especificaciones requeridas por el fabricante de las turbinas”.

En el estudio se identificaron y evaluaron las mejoras necesarias en los sistemas de acondicionamiento del gas combustible y/o arranque del complejo Muscar, de manera de visualizar nuevos sistemas de remoción de contaminantes en el gas y proponer un sistema que garantizara las especificaciones de los fabricantes.

El informe concluyó que: a) la fuente de gas combustible utilizada por la Planta no cumple con las normas establecidas por el fabricante, debido a que la infraestructura del mismo no es la más adecuada; b) En los escenarios evaluados el gas combustible era entregado al cabezal de distribución justo en su punto de rocío, favoreciendo las condiciones para la formación de líquidos, c) Utilizar la fuente de 3102,6 kPa (450 psig), favorece la condensación de líquido en la línea de succión del gas combustible, debido a la hidráulica del sistema así como la falta de calentamiento, además de este problema se encontraron sólidos en el cabezal de succión.

2.2. Descripción general del área en estudio

La Planta de Inyección de Gas a Alta Presión, PIGAP I, está ubicada en el Complejo Operativo Muscar (COM) en el Municipio Ezequiel Zamora del Estado Monagas.

PIGAP I tiene como función comprimir el gas proveniente del Sistema de Deshidratación Muscar y de la Planta de Extracción Santa Bárbara para inyectarlo a 62053 kPa (9000 psig) en las áreas Carito central y oeste del yacimiento Carito (véase figura 2.1).

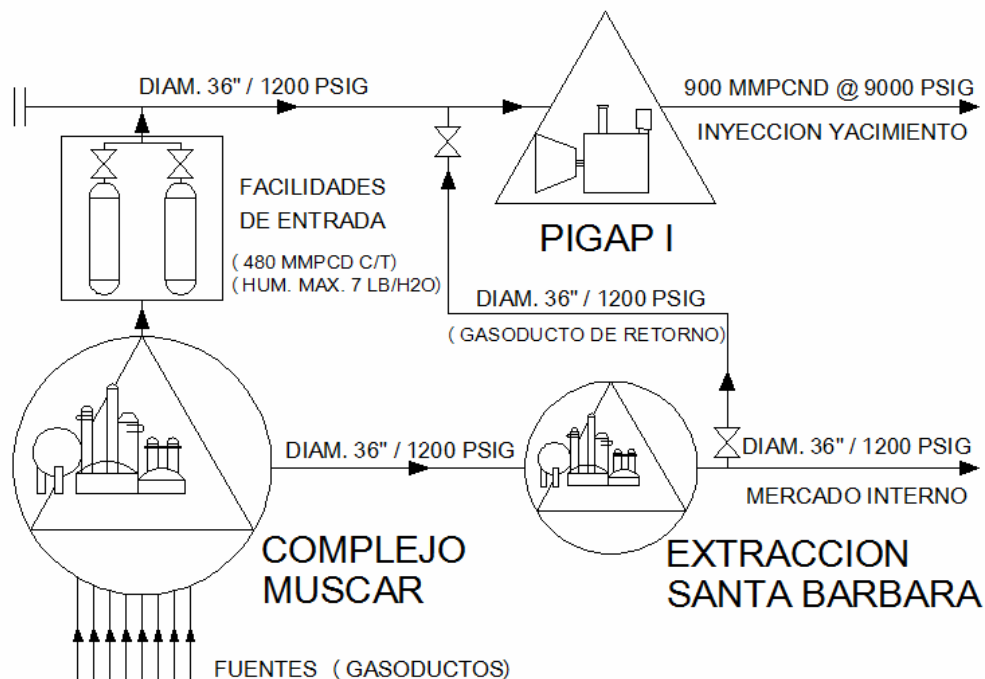


Figura 2.1. Esquemático de operación Complejo Muscar.

La Planta tiene actualmente una capacidad instalada de compresión de gas de 294,96 m³/s (900 MMPCNGD), distribuidas en cinco (5) trenes de compresión de gas, con una capacidad de 59 m³/s (180 MMPCNGD) por cada tren. Los trenes son accionados por las turbinas modelo MS 5002 (véase figura 2.2) y han sido diseñados para incrementar la presión del gas desde 8273,7 kPa (1200 psig) hasta 62053 kPa (9000 psig) a través de un proceso de compresión interetapas, por medio de los compresores centrífugos modelo BCL.

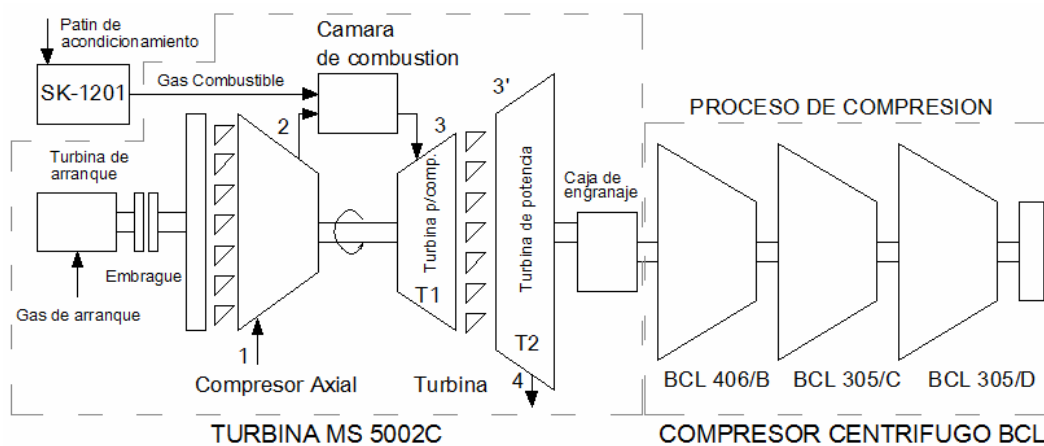


Figura 2.2. Esquemático de accionamiento (turbina) y de un tren de compresión FIGAP I. Tomado de “Memoria Descriptiva FIGAP I”.

A condiciones de diseño de la planta, el gas de entrada se maneja a través de un cabezal de succión, a una presión de 8273,7 kPa (1200 psig) y 322 K (120 °F) (véase punto 1, figura 2.3), desde donde se distribuye equitativamente a los cinco trenes de compresión.

En la entrada de gas de cada tren de compresión existe un Depurador (S-1201) de succión cuya función es la retener los líquidos en la corriente de gas para evitar que estos lleguen al compresor.

A la salida del compresor (BCL 406B) de primera etapa (véase punto 2), el gas se encuentra a 22725 kPa (3296 psig) y 429,81 K (314 °F). Seguidamente, este gas es enfriado hasta 322 K (120 °F) en intercambiadores de calor tipo Fin-Fan (E-1201) y luego pasa al depurador (S-1201) de succión de la segunda etapa para retirársele los líquidos formados por el descenso de la temperatura.

El gas entra en la segunda etapa de compresión (BCL 305C) a 22518 KPa (3266 psig) y 322 K (120 °F), desde donde descarga a 40631 KPa (5893 psig) y 372 K (210 °F) (véase punto 3), para luego ser enfriado (E-1203) hasta 322 K (120 °F) y depurado nuevamente (S-1203).

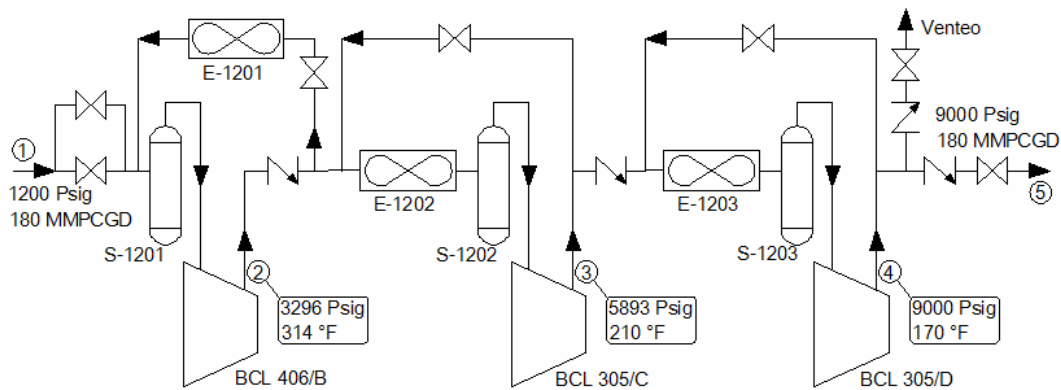


Figura 2.3. Esquemático de compresión interetapas PIGAP I. Tomado de “Memoria Descriptiva PIGAP I”.

Posteriormente, el gas entra en la tercera etapa de compresión (BCL 305D) a 40355 kPa (5853 psig) y 322 K (120 °F), para descargar a 62053 kPa (9000 psig) y 349,8 K (170 °F) (véase punto 4). Seguidamente este gas pasa al cabezal de descarga de la planta para finalmente ser distribuido en la seis (6) macollas que surten a los diecisiete (17) pozos inyectores ubicados en el yacimiento Carito.

2.3. Bases teóricas

2.3.1 Gas Natural

El gas natural es una fuente de energía no renovable formada por una mezcla de gases que se encuentran frecuentemente en yacimientos fósiles, no-asociado (solo), disuelto o asociado (acompañado) al petróleo o en depósitos de carbón. Aunque su composición varía en función del yacimiento del que se extrae, está compuesto principalmente por metano, y suele contener otros gases como nitrógeno, etano, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, butano, propano, mercaptanos y trazas de hidrocarburos más pesados [3].

El gas natural es utilizado en la industria petrolera nacional como materia prima de la Petroquímica, Gas Combustible en diferentes procesos y como Gas de Inyección para incrementar la recuperación del petróleo mediante el mantenimiento o aumento de la presión en los yacimientos.

2.3.2. Propiedades y Comportamiento del Gas Natural

Un gas, es definido como un fluido homogéneo, generalmente de baja densidad y viscosidad, sin volumen definido y ocupa cualquier espacio en el cual se coloca. Los gases que se ajustan a esta definición se denominan gases perfectos o ideales [4].

La definición anterior del gas, se cumple generalmente en condiciones de baja presión y temperatura, pero gradualmente el gas se aparta de esta definición, y el comportamiento teórico se aleja del observado, a medida que aumenta la presión y/o la temperatura.

2.3.3. Propiedades Físicas del Gas Natural

Durante la recolección, transporte, procesamiento, almacenamiento y distribución del gas natural, pueden existir condiciones de presión, volumen y temperatura muy variables. Es indispensable el conocimiento estas propiedades físicas tanto para el diseño de los equipos o sistemas, como para su procesamiento y distribución.

Dado que el gas natural es una mezcla de hidrocarburos, la cual varía en cantidades relativas, las propiedades físicas de una mezcla dependerán de las propiedades individuales de sus componentes y su grado de contribución a la mezcla. Entre las propiedades se encuentran:

2.3.3.1. Peso molecular del gas, PM

El gas natural por ser una mezcla de hidrocarburos debe sus propiedades a los componentes puros que lo forman, ya que una mezcla no se puede representar con una fórmula sencilla, su comportamiento puede estudiarse considerando el denominado peso molecular aparente. Es por ello que esta se obtiene sumando la fracción molar de cada i -ésimo (Y_i) componente por su respectivo peso molecular (PM_i), es decir:

$$PM = \sum_{i=1}^n Y_i \times PM_i \quad [2.1]$$

2.3.3.2. Gravedad específica, γ_g

La gravedad específica de un componente del gas se define como la razón de la densidad de una sustancia a la densidad del aire, ambas medidas a las mismas condiciones de presión y temperatura.

$$\gamma_g = \frac{\rho_g}{\rho_a} = \frac{PM_g}{PM_a} \quad [2.2]$$

Donde:

- PM_g : Peso molecular del gas, lb/lbmol.
- PM_a : Peso molecular del aire (28,96 lb/lbmol).

Si se conoce la gravedad específica de los componentes γ_i , y la fracción molar de los mismos (Y_i), la gravedad específica de la muestra puede calcularse por:

$$\gamma_g = \sum_{i=1}^n Y_i \times \gamma_i \quad [2.3]$$

2.3.3.3. Densidad del gas, ρ_g

Se define la densidad, como la relación entre la masa de una sustancia por unidad de volumen. En el caso de un gas se rige por la ecuación:

$$\rho_g = \frac{P \times PM_g}{Z \times R \times T} \quad [2.3]$$

Donde:

- ρ_g : Densidad, lb/pie³.
- PM : peso Molecular, lb/lbmol.
- P : Presión, psia.
- T : Temperatura, °R.
- R : 10,73 psia*pie³/lbmol*°R.
- Z : Factor de compresibilidad, adimensional.

Sustituyendo la gravedad específica por su definición dada en la ecuación 2.2, se tiene:

$$\rho_g = \frac{P \times 28,96 \times \gamma_g}{Z \times 10,73 \times T}$$

$$\rho_g = 2,7 \times \frac{P \times \gamma_g}{Z \times T} \quad [2.5]$$

2.3.3.4. Volumen específico, ν

Se define como el volumen ocupado por una sustancia por unidad de peso, y para el caso de un gas real se expresa como:

$$\nu_g = 0,3704 \times \frac{Z \times T}{P \times \gamma_g} \quad [2.6]$$

Donde:

- ν : Volumen específico, pie³/lb.
- PM : peso Molecular, lb/lbmol.
- P : Presión absoluta, psia.
- T : Temperatura absoluta, °R.
- R : 10,73 psia*pie³/lbmol*°R.
- Z : Factor de compresibilidad, adimensional.

2.3.3.5. Factor de compresibilidad, Z

Es un parámetro con el cual se corrige el comportamiento de los gases ideales para ajustarlos a las condiciones reales o actuales, expresando la manera como realmente se comportan los fluidos compresibles. El valor de Z establece una diferencia fundamental entre el comportamiento de los fluidos en estado líquido y el de los fluidos gaseosos.

La ecuación a usar será la de los gases ideales pero con el factor Z como corrección:

$$P \times V = Z \times n \times R \times T \quad [2.7]$$

Se ha determinado que el valor de Z para diferentes gases con base en el teorema de los estados correspondientes, el cual dice que a las mismas condiciones de presión y temperaturas pseudo-reducidas, todos los gases tienen el mismo factor de compresibilidad. La presión y temperatura pseudo-reducidas están definidas como:

$$P_{sr} = \frac{P}{P_{sc}} \quad [2.8]$$

$$T_{sr} = \frac{T}{T_{sc}} \quad [2.9]$$

Donde:

- P_{sr} y T_{sr} : Presión y Temperatura pseudo-reducidas, adimensional.
- P y T : Presión y Temperatura absoluta de operación, psia.
- P_{sc} y T_{sc} : Presión y Temperatura pseudo-críticas, psia.

Standing y Katz desarrollaron una correlación gráfica, la cual se puede utilizar para determinar el factor de compresibilidad del gas natural a partir de la presión y temperatura pseudo-reducidas (véase figura 2.4). Además de este existen otros métodos para calcular el valor de Z, tales como, Peng Robinson (PR), Soave-Redlich-Kwong (SKR), entre otros.

2.3.3.6. Viscosidad del gas, μ_g

Es la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de este, que se aplica a una porción de fluido para que adquiera movimiento [4].

La viscosidad de los gases tendrá el siguiente comportamiento:

- A bajas presiones (menor a 10342 kPa o 1500 psig), un aumento de la temperatura aumentará la viscosidad del gas.
- A altas presiones (mayor a 10342 kPa o 1500 psig), un aumento de la temperatura disminuye la viscosidad.
- A cualquier temperatura, si se aumenta la presión la viscosidad aumenta.
- La viscosidad será mayor, a medida que el gas posea componentes más pesados.

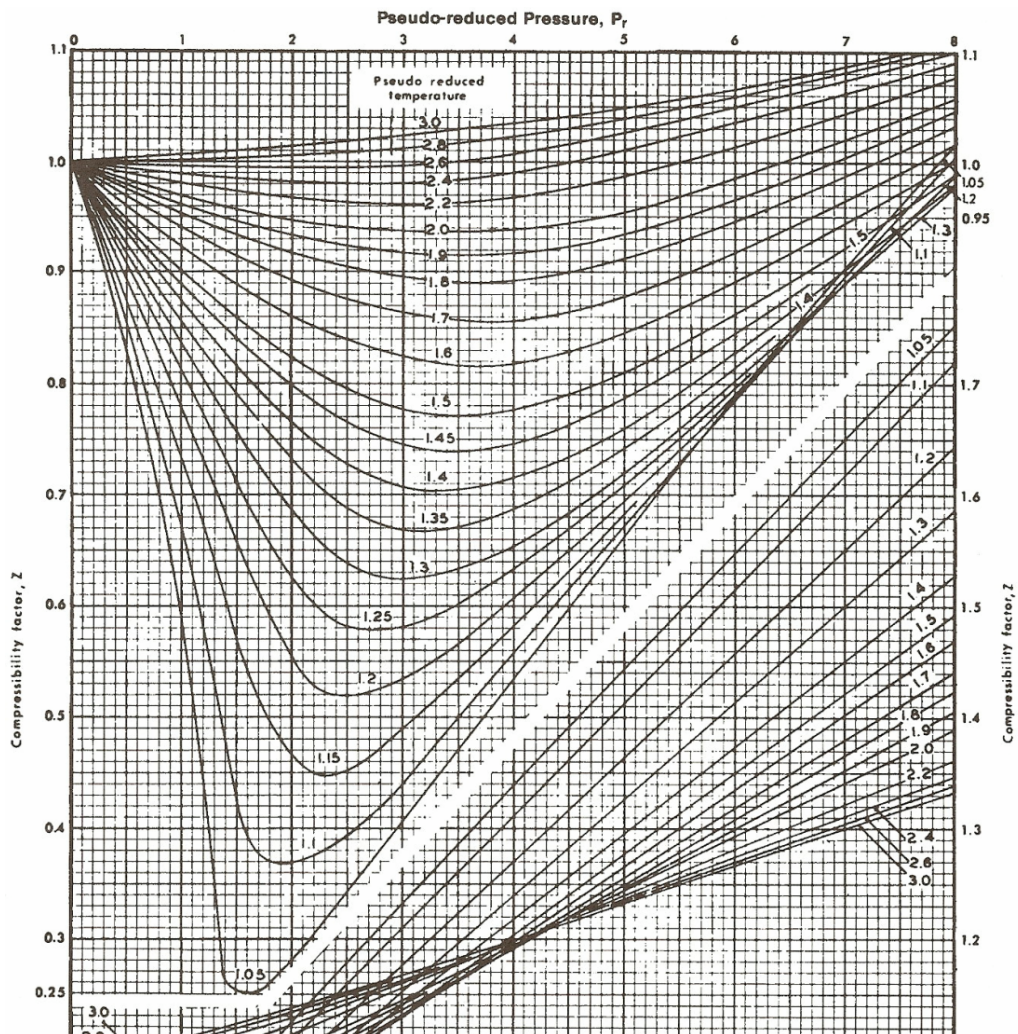


Figura 2.4. Factor de compresibilidad (Z) para el gas natural. Tomado de GPSA (vol. 2, p. 23-12).

2.3.4 Contenido de agua en el Gas Natural

El gas natural está frecuentemente saturado en agua en el yacimiento, cuando éste sale del reservorio y fluye hacia los cabezales de los pozos, que tienen

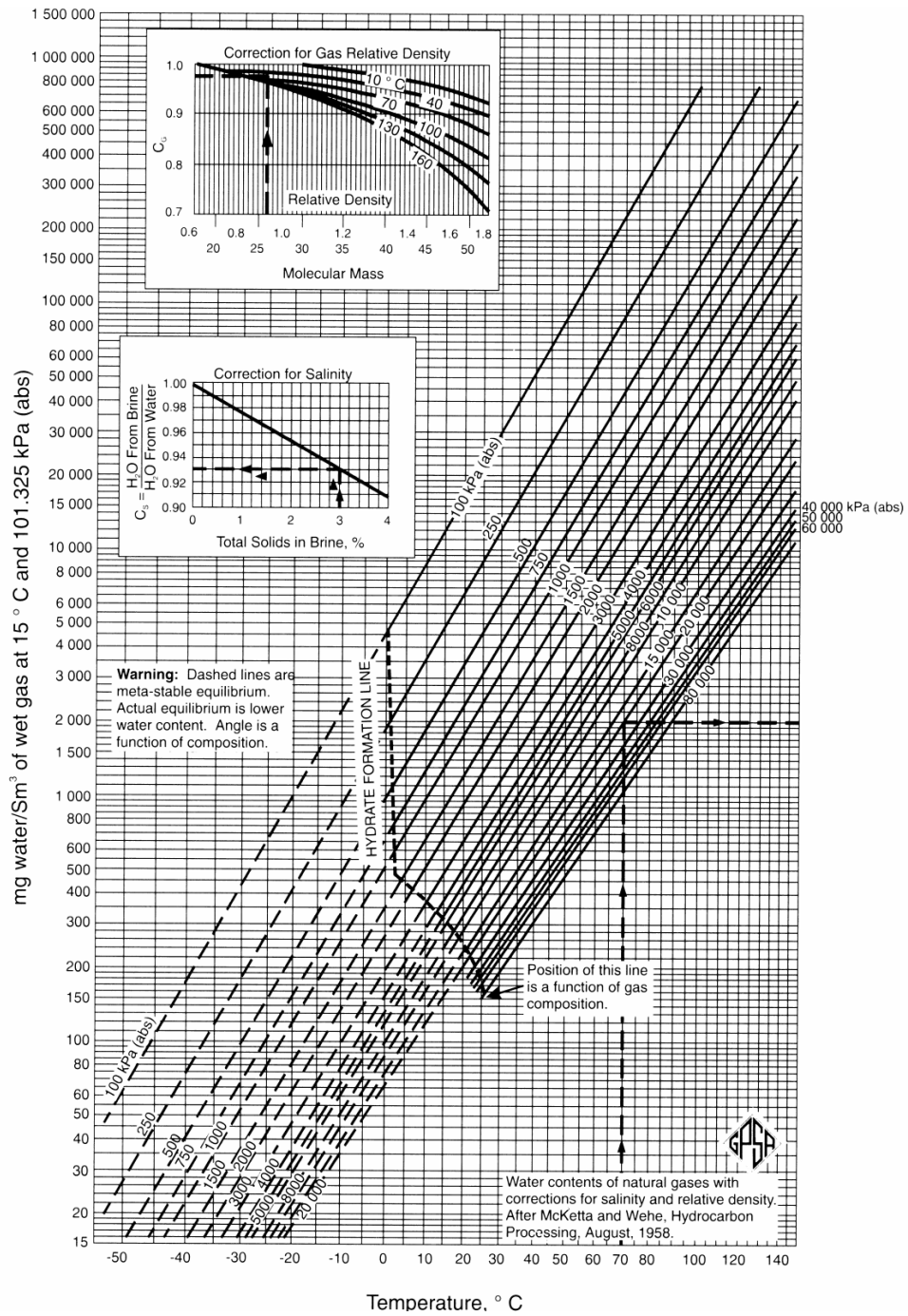
temperaturas más bajas, tenderá a producir un condensado de agua. La pérdida de presión también afecta el contenido del agua, pero este efecto es menor que el asociado al cambio de temperatura.

Los efectos del agua en el gas natural requieren de dos cálculos principalmente, el primero es cuantificar el contenido del agua en el gas y el segundo son las predicciones para las condiciones a las cuales habrá formación de hidratos.

El contenido de agua en el gas depende de las condiciones de presión y temperatura y de la composición del gas. El efecto de la composición se incrementa con la presión y esta es particularmente importante si el gas contiene dióxido de carbono y/o sulfuro de hidrógeno. Actualmente existen varios métodos para calcular este [5]:

- Relaciones de presiones parciales y fugacidad parcial.
- Cartas empíricas de contenido de agua en el gas para diferentes P y T.
- Correlaciones de P y T por la presencia de contaminantes tales como sulfuro de hidrogeno, dióxido de carbón y nitrógeno.
- Ecuaciones de estado PVT.

Para el gas natural (rico o pobre) cuyo contenido de metano sea mayor al 70% y con pequeñas cantidades de hidrocarburos pesados se puede utilizar la carta de la figura 2.5 para estimar el contenido del agua en el gas natural [6].



A
 OS O
 n el
 1 el

- Se logran alcanzar las especificaciones del gas de acuerdo al uso.
- Previene la corrosión.

2.3.5. Hidratos

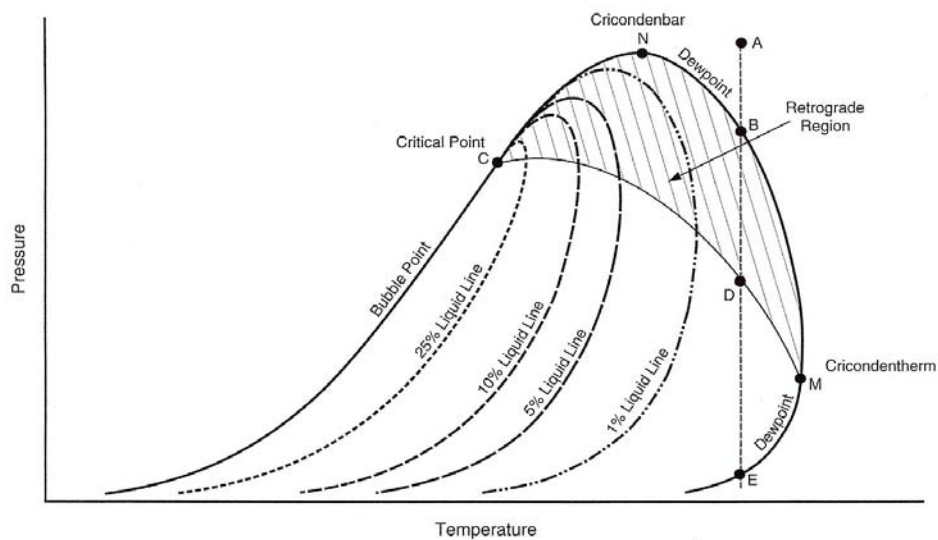
Los hidratos de gas son un grupo especial de sustancias químicas cristalinas que ocurren naturalmente, de agua y gases de poco peso molecular, llamados compuestos de inclusión, que tiene una estructura clatharica o de jaula y que incluyen moléculas de gas metano. La molécula huésped en dicha estructura es agua, en forma de hielo y la inclusión son el metano y otros gases. Son sustancias sólidas que se asemejan al hielo, sin embargo se pueden formar a temperaturas sobre el punto de congelación del agua [7].

La formación de hidratos en el gas natural se presentará si existe agua libre y esta se enfría por debajo de la temperatura llamada “de formación de hidratos”. Los hidratos representan un problema solo si se aglomeran a un grado en el cual restringen o detiene el flujo del gas [5].

2.3.6. Diagrama de Fases

Generalmente, cuando se hace referencia al gas natural se habla de una mezcla de hidrocarburos que a condiciones ambiente se encuentra en estado gaseoso. Sin embargo la posibilidad de que el llamado gas natural esté realmente en estado gaseoso depende de su composición, de la presión y de la temperatura a las cuales está sometido. Es decir, cualquier gas se puede licuar o ser mantenido en forma gaseosa mediante la correcta utilización de la presión y la temperatura.

A través de ecuaciones específicas se puede describir el comportamiento de fases de un hidrocarburo, es decir, se puede estimar qué fases coexisten bajo condiciones conocidas de presión y temperatura. La representación gráfica de esta información es lo que se conoce como envolvente de fases de un hidrocarburo, que dependerá exclusivamente de la composición de hidrocarburo en cuestión (véase figura 2.6).



Existen varios términos utilizados para definir la ubicación de varios puntos en la envolvente de fases, los cuales se explican a continuación [5]:

Cricondenbárico: Es el punto de máxima presión en el que el líquido y el vapor pueden existir (punto N).

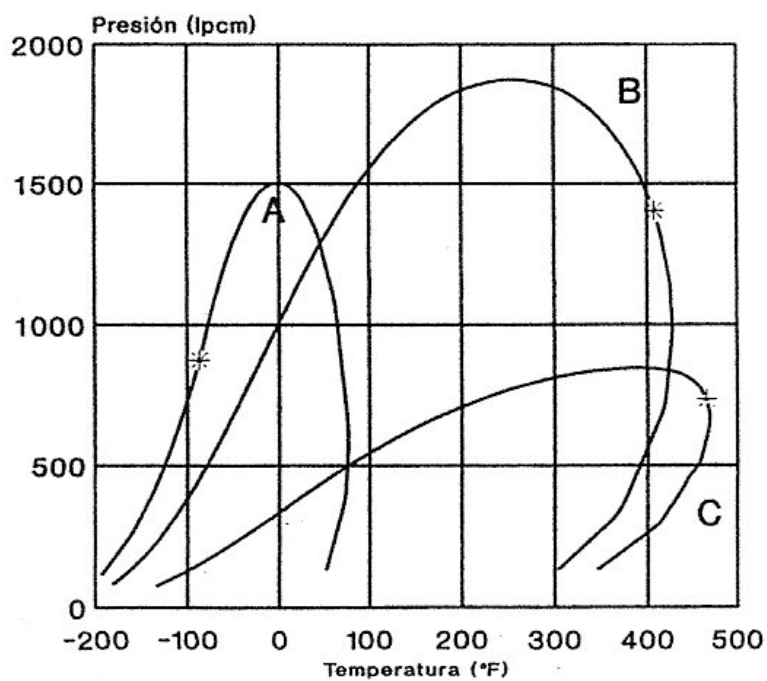
Cricondertérmico: Es el punto de máxima temperatura a la cual el líquido y el vapor pueden coexistir en equilibrio (punto M).

Región Retrograda: Dentro de esta área de la envolvente ocurre condensación de líquido al disminuir la presión o al incrementar la temperatura (opuesto al comportamiento normal conocido).

Líneas de Calidad: Estas, muestran porcentajes constantes de calidad (% de la fase de vapor presente en la mezcla de fases líquido – vapor), se interceptan en el punto crítico C y son esencialmente paralelas a las curvas de Punto de Ebullición (Bubble Point) y Punto de Rocío (Dew Point). La curva de punto de ebullición representa el 0% de vapor y la curva de punto de rocío es el 100% de vapor.

La línea ABDE (véase figura 2.6), representa un proceso isotérmico de condensación retrograda en un yacimiento de condensado. El punto A representa la fase inicial del fluido que en este caso es vapor 100%. A medida que la presión disminuye se alcanza el punto B donde comienza la condensación y se formará cada vez mas líquido, en la medida en que se reduzca la presión. Una vez que se comience a salir del área retrograda (punto D), el proceso se invierte y el líquido se comenzará a evaporar hasta alcanzar la curva de punto de rocío (punto E), donde ya se puede considerar 100 % vapor la fase existente. Por debajo del punto E no hay formación de líquidos.

En la figura 2.7, se puede observar los diagramas de fase del fluido que entra a un separador. La envolvente de fases para este fluido está representada por la curva (B). Luego que ocurre la separación, cada fluido y fase tendrán su correspondiente envolvente de fases, que en este caso el gas está representado por la curva (A) y el líquido por la curva (C).



l, J. (vol. 1, p. 98).

2.3.6. Cromatografía de Gases

Es una técnica en la que la muestra se volatiliza y se inyecta en la cabeza de una columna. Existen dos tipos de cromatografía de gases: la Cromatografía de Gas-Sólido (GSC) y la Cromatografía de Gas-Líquido (GSL).

La cromatografía de gases permite determinar cuantitativa y cualitativamente los componentes de la muestra. Tanto del gas que se extrae de los yacimientos como del monitoreo de este en los diferentes procesos a los cuales es sometido el gas. Se debe hacer la respectiva cromatografía a los efectos de verificar si se están cumpliendo con los parámetros de calidad del gas para sus diferentes usos.

2.3.7. Turbocompresores

Uno de los procesos de recuperación secundaria de crudo utilizados por la industria petrolera nacional se encuentra el de inyección de gas. Para llevar a cabo este método, se usan los turbocompresores puesto que estos equipos generan las presiones necesarias para ser inyectadas a los yacimientos. Un turbocompresor se compone de una turbina y un compresor en serie, de forma tal, que la turbina le entrega la potencia necesaria al compresor para que este eleve la presión del gas para su posterior inyección.

2.3.8. Turbinas

La turbina propiamente dicha es un dispositivo diseñado para extraer energía cinética de un fluido, que fluye a través de ella, y trasformarla en potencia útil. En esta, las partículas de flujo que salen a gran velocidad de la tobera sufren un cambio en la dirección de movimiento, generando una variación en el momentum y por lo tanto una fuerza y torque [8].

2.3.8.1. Turbinas a gas

Se denomina turbina de gas a un motor térmico que disponga de un turbocompresor para comprimir gas, una cámara de combustión con el objeto de elevar el nivel térmico y una turbina, donde se extrae energía de los gases expansionándolos (véase figura 2.8). La turbina de gas generalmente opera en ciclo abierto, por comunicarse con la atmósfera y expele a ella gases de escape o humos [8].

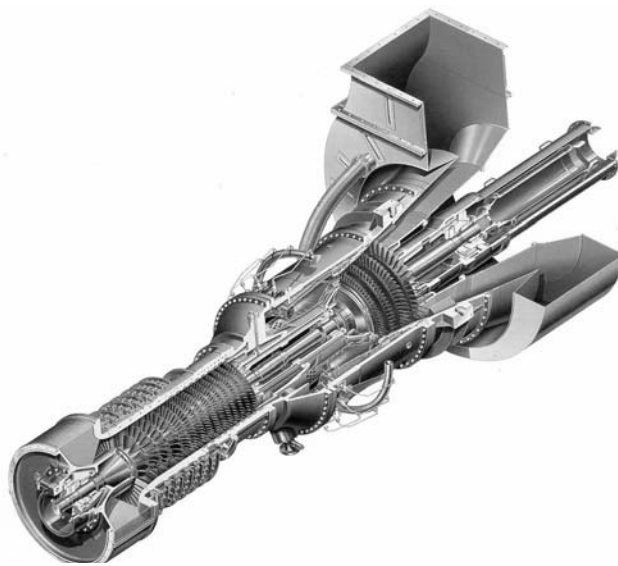


Figura 2.8. Turbina a Gas Modelo Mars. (Fuente Solar Turbines)

2.3.8.2. Turbina de gas de ciclo abierto

Las turbinas de gas de combustión constan fundamentalmente de un compresor, una cámara de combustión y una turbina. El aire aspirado a presión atmosférica se comprime en el compresor, pasando a continuación a la cámara de combustión, en la que se inyecta el combustible que se autoinflama a causa de la elevada temperatura, y los gases calientes procedentes de la combustión se expanden contra los álabes de la turbina. Estas cámaras de combustión están diseñadas de forma que no todo el aire

pase al quemador, sino que se produzcan varias corrientes. La corriente principal es la que interviene en la combustión, mientras que las secundarias se mezclan a la salida con los gases de combustión y así disminuir su temperatura a fin de no dañar los álabes de la turbina. Para este tipo de turbinas el ciclo termodinámico teórico es el denominado ciclo de Brayton o ciclo de Diesel de expansión completa.

El compresor consta de dos elementos: el rotor (rodete) y el difusor (toberas). El rotor, centrífugo o radial, acelera el aire entrante, y la energía cinética que adquiere se transforma en energía de presión en el difusor.

Por su parte, las turbinas están constituidas por un distribuidor y un rotor. El distribuidor disminuye la presión de los gases calientes, incrementando su velocidad, mientras que en el rotor la energía cinética se transforma en energía mecánica.

2.3.8.3. Ciclo termodinámico de las turbinas de gas

El modelo termodinámico de las turbinas de gas se fundamenta en el ciclo de Brayton. A pesar de que se generaliza como ciclo termodinámico, en realidad el fluido de trabajo no cumple un ciclo completo en las turbinas de gas ya que este finaliza con una composición o en un estado diferente al que tenía cuando inició los procesos. Las turbinas de gas de ciclo abierto simple utilizan una cámara de combustión interna para suministrar calor al fluido de trabajo (véase figura 2.9) y las turbinas de gas de ciclo cerrado simple utilizan un proceso de transferencia para agregar o remover calor del fluido de trabajo [8].

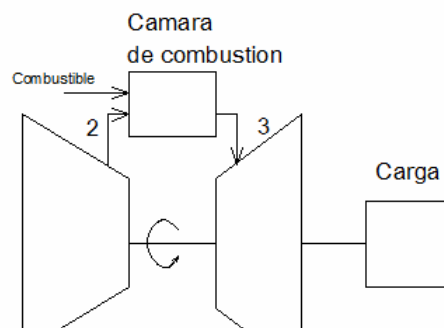


Figura 2.9. Ciclo Brayton, en su modalidad de ciclo abierto, para una turbina de eje simple. Tomado de Lecuona, A. (p. 29).

La turbina de gas mostrada en la figura 2.9 está compuesta por un compresor, una cámara de combustión, la turbina y el eje; que esta directamente unido a la carga. En esta configuración todos los componentes giran a la misma velocidad.

El ciclo básico de Brayton en condiciones ideales está compuesto por cuatro procesos (véase figura 2.10). En el punto 1 el aire es tomado a presión y temperatura atmosférica y es comprimido hasta el punto 2; este proceso es considerado isentrópico y el aire disminuye su volumen debido a la compresión. Luego se produce el aumento de volumen a presión constante desde el punto 2 al punto 3 (proceso de combustión), desde el punto 3 hasta el punto 4 los gases calientes son expandidos, mediante un proceso isentrópico, para luego ser descargados a la atmósfera en el punto 4.

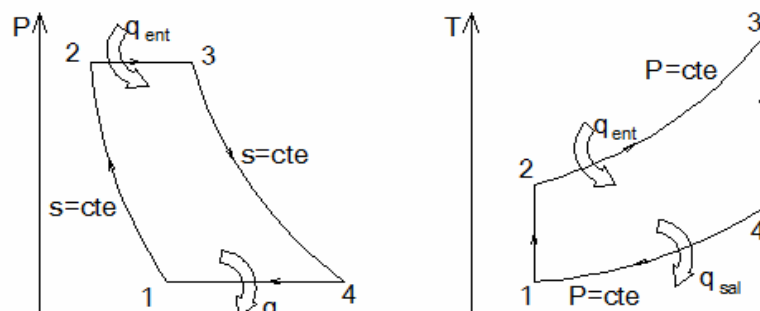
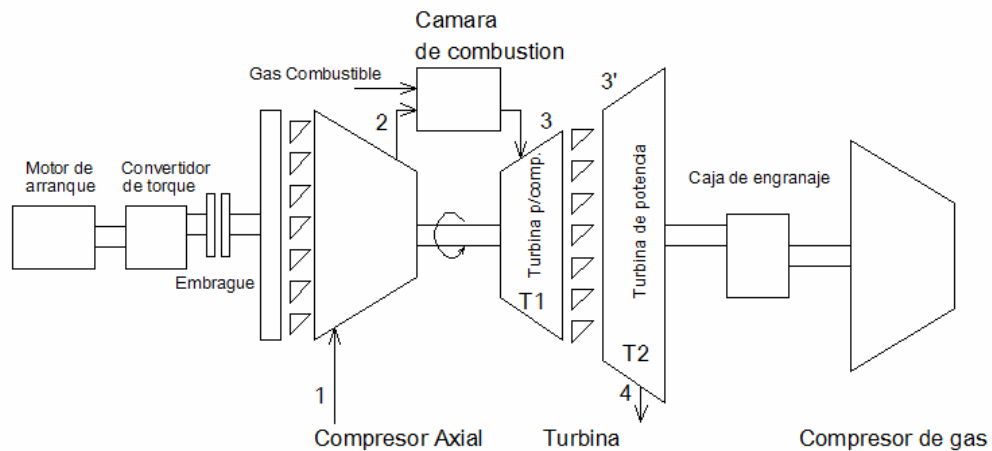


Figura 2.10. Ciclo termodinámico básico de las turbinas de gas, diagramas P-v y T-s.
Tomado de Wikipedia.

2.3.9. Turbina de Gas Nuovo Pignone modelo MS5002C

Turbina de gas del modelo de la serie 5002 con dos árboles es una máquina que se usa para accionar un compresor centrífugo. La turbina de gas tiene dos ejes independientes. En la primera etapa, o alta presión (T1), la rueda de la turbina acciona el rotor del compresor de la unidad productora de gas. En la segunda etapa, o baja presión (T2), la rueda de la turbina acciona el compresor de carga (véase figura 2.11). En definitiva este diseño permite que los dos ejes trabajen a diferentes velocidades para satisfacer los requerimientos de carga del compresor centrífugo, para más detalle, véase anexo 1.



ne

2.3.9.1. Funcionamiento de la turbina de gas modelo MS5002

Durante la puesta en marcha, el compresor/rotor de la turbina de alta presión al inicio consume el 20% de la velocidad por medio del sistema de arranque. El aire atmosférico, absorbido por el compresor (punto 1) (véase figura 2.11), aumenta su presión en el compresor y se lleva a través de las tuberías a las cámaras de combustión donde es llevado el combustible a una determinada presión (punto 2). Una chispa de alto voltaje inflama la mezcla de combustible-aire (una vez inflamada, la combustión queda continua en las cámaras). Los gases calientes (punto 3) incrementan la velocidad del compresor/rotor de la turbina de alta presión (T1). Esto a su vez, incrementa la presión de descarga del compresor. Cuando la presión comienza a aumentar, el rotor de la turbina de baja presión (T2) empieza a girar y una vez establecido el régimen de giro, las RPM del compresor-rotor permanecen constantes. Los productos de la combustión se expanden primero en la turbina de alta

presión, luego, a través de la turbina de baja presión para posteriormente ser expulsados a la atmósfera (punto 4) [9].

La sección del compresor axial consiste del rotor y el estator, el cual incluye 16 etapas de compresión y cada etapa incrementa la presión una determinada cantidad. Los alabes del rotor suministran la fuerza necesaria para comprimir el aire en cada etapa y los alabes del estator guían el aire para que este entre a la siguiente etapa con el ángulo apropiado. En la entrada del compresor axial se localiza el IGV (inlet guide vane) o guías de entrada, que regula la cantidad de aire de entrada.

La sección de combustión de la turbina de gas está compuesta por 12 cámaras de combustión externas, 12 quemadores y 2 bujías. El combustible es alimentado a cada uno de los quemadores y la combustión de la mezcla de gas y el aire es encendida por las bujías. Solo dos bujías son instaladas en dos cámaras de combustión, las cámaras restantes, que no tienen bujías, son encendidas a través de los tubos cruza llamas que las interconectan.

La sección de la turbina es donde los gases a alta temperatura y presión provenientes de la sección de combustión son convertidos en potencia mecánica, es decir la energía térmica es convertida en energía mecánica. Una etapa de la turbina está montada en el eje de alta presión y la otra etapa en el de baja presión para impulsar la carga. Aproximadamente el 60% de la energía generada en la turbina se requiere para manejar el compresor axial y otro 35% está disponible para la carga, como energía útil. Esta turbina esta diseñada para operar solo con gas como combustible [9].

2.3.10. Sistema de gas combustible

El sistema de gas combustible está diseñado para llevar el combustible gaseoso a las cámaras de combustión de las turbinas con la presión y cantidad de flujo adecuadas para satisfacer los requerimientos de funcionamiento de la turbinas de gas en cuanto a la puesta en marcha, aceleración y carga de la misma.

El gas combustible de una planta por lo general es el mismo gas de compresión, pero es de gran importancia que las condiciones del mismo sean apropiadas para el adecuado funcionamiento de la turbina.

2.3.10.1. Elementos que conforman un sistema de gas combustible.

Gasoductos: son tuberías que permiten el transporte y distribución del gas combustible se diseñan en función al tipo de fluido y caudal que manejan.

Intercambiador de calor: la función básica de estos equipos es la transferencia de energía térmica entre dos o más fluidos a diferentes temperaturas. El calor fluye como resultado del gradiente de temperatura, desde el fluido caliente hacia el frío.

De acuerdo a la clasificación generalizada de los intercambiadores de calor, estos pueden ser: a) Directos (Abiertos o cerrados al medio ambiente), b) indirectos o Recuperadores (Tubo dentro de otro tubo, Concha y tubos, Enfriados por aire e intercambiadores de placas o platos), c) Regeneradores y d) Hornos.

Dentro del presente estudio se encuentran los intercambiadores de calor de concha y tubos o también conocidos como de tubo y carcasa. Siendo estos de amplia utilización en la industria petrolera.

Un intercambiador de tubo y carcaza consiste en un haz de tubos paralelos encerrados en un estuche cilíndrico llamado carcaza. Este de fácil mantenimiento y relativamente simple de construir en diferentes tamaños, además puede ser diseñado para presiones desde moderadas a altas, sin que varíe sustancialmente el costo.

Válvulas: Son dispositivos empleados para regular, controlar, bloquear, el flujo de un líquido, un gas, una corriente, entre otras. Existe una gran variedad de estas desde pequeños hasta grandes diámetros, según la necesidad del sistema o instalación.

Válvulas de control: Son válvulas automáticas utilizadas en los procesos industriales, realiza la función de variar el caudal del fluido de control que modifica a su vez el valor de la variable medida, comportándose como un orificio de área continuamente variable.

Válvula reductora – reguladora de presión: Mantiene la presión de salida en un valor deseado por el usuario. Una vez fijada, esta presión de salida es constante e independiente de las variaciones de caudal y de la presión de entrada.

Depurador: los depuradores son una clase de separadores y se caracterizan por no poseer capacidad para realizar una separación gas-líquido cuando los volúmenes de líquido son apreciables, ni tamaño suficiente para que el asentamiento por fuerzas gravitatorias sea óptimo. Por lo que su función básica es remover pequeñas cantidades del líquido de una mezcla con predominio gaseoso.

Filtro – Separador: Es un dispositivo que se usa generalmente para remover partículas sólidas y líquidas del gas.

Este tipo de filtro separador posee dos compartimientos. El primero contiene unos filtros coalescentes, cuando el gas fluye a través de estos filtros, las partículas líquidas coalescen y forman partículas de mayor diámetro. Cuando estas partículas alcanzan diámetros apreciables son empujados a un segundo compartimiento por el flujo del gas.

En el segundo compartimiento son removidas las gotas de mayor diámetro. En algunos casos la remoción puede ser aproximadamente 100% por partículas mayores de 2 micrones y cerca del 98% para partículas entre 0,5 y 2 micrones.

2.3.11. Simulación de procesos

La simulación de procesos es una herramienta de ingeniería que permite representar un proceso o fenómeno real mediante otro más simple, lo cual permite analizar las características del primero. En ella se distinguen cuatro fases: de entrada, de preprocesamiento, de cálculo y de salida.

Los avances en los sistemas computarizados ha permitido el desarrollo de programas y paquetes de simulación (software) con lo cual se puede afrontar la resolución de complejos problemas físicos matemáticos cuya resolución analítica sería imposible. Así pues, la simulación intenta reproducir la realidad a partir de la resolución numérica con el uso del computador, de las ecuaciones matemáticas que describen dicha realidad.

2.3.12. Simulador HYSYS

Aspen Tech es la empresa que desarrolla y comercializa el simulador HYSYS, el mismo integra todo el proceso de diseño de instalaciones, es decir permite obtener desde el dimensionamiento de los equipos, hasta estudios preliminares de costo, todo en un solo ambiente.

El simulador Aspen HYSYS permite simular las operaciones de sistemas o instalaciones complejas en régimen estacionario o transitorio. Contiene una extensa base de datos con ecuaciones termodinámicas, así como de modelos para el cálculo de procesos de destilación, reacciones químicas, transferencia de calor, equipos rotativos, entre otros. Posee una importante precisión en los cálculos, mejorando los tiempos de respuesta [10].

CAPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo de investigación

Según la naturaleza del problema y los objetivos planteados, la investigación es en primer lugar de carácter documental, ya que se observa y reflexiona sistemáticamente sobre realidades (teóricas o no) utilizando para ello diferentes tipos de documentos; y en segundo lugar, de campo, porque la técnica a seguir por el investigador se basará en métodos que permitan obtener datos en forma directa en la organización involucrada en la investigación.

Al respecto, Balestrini (2001) señala: “un diseño de investigación se define de campo, porque los datos obtenidos son de fuente primaria, en los estudios de campo el investigador usa la selección de sujetos y la medición de condiciones existentes en la situación de campo como un método de determinar correlaciones” (p. 136) [11].

Según Tamayo y Tamayo (2001), expresa que: “La investigación documental, es cuando recurrimos a la utilización de los datos secundarios, es decir aquellos que han sido obtenidos por otros y nos llegan elaborados y procesados de acuerdo con los fines de quienes inicialmente los elaboran y manejan”. (p. 109) [12].

3.2 Nivel de la investigación

El estudio a realizar tiene un nivel descriptivo porque comprende la descripción, registro, análisis e interpretación de las condiciones existentes en el momento y no se altera el curso de los eventos.

Al respecto Tamayo y Tamayo (2001) plantea que la investigación descriptiva: “Consiste en comprender la descripción, registro, análisis e interpretación de la naturaleza actual y la composición o procesos de los fenómenos”. (p. 54) [12].

Durante el desarrollo de la investigación se realiza una descripción del proceso de acondicionamiento del gas combustible que es utilizado por los turbocompresores de PIGAP I, así como lo relacionado a las condiciones actuales de operación.

3.3 Universo o población

El estudio a realizar es de un enfoque cuantitativo, al respecto Selltiz, (1980); citado por Hernández Sampieri, (2003, p. 301) define a la población como un conjunto de todos los casos que concuerdan con una serie de especificaciones [13].

La población a abordar en esta investigación, está conformada por todos los elementos que componen el sistema de gas combustible que alimenta a los cinco trenes de turbocompresión de PIGAP I.

Se conoce con el nombre de muestreo al proceso de extracción de la muestra a partir de la población. Entre las ventajas que proporciona el muestreo (Latorre, Rincón y Arnal, 2003) suele señalarse: el ahorro de tiempo en la realización de la

investigación, la reducción de costos y la posibilidad de mayor profundidad y exactitud en los resultados [14].

La selección correcta de la muestra implica una que represente a la población con la mayor fidelidad posible. Es por ello que se utilizó la técnica del muestreo no probabilística, ya que en la selección de la muestra no se utiliza el criterio de equiprobabilidad, sino de causas relacionadas con las características de la investigación o criterios del investigador.

En esta investigación la muestra no coincide con la población debido a que se evalúa solo uno de los cinco patines de acondicionamiento de gas combustible de PIGAP I, específicamente se seleccionó el patín número 1 (SK-1201).

3.4 Área de investigación

La presente investigación se llevará a cabo en la empresa Petróleos de Venezuela, S.A., específicamente en el sistema de gas combustible de la Planta de Inyección de Gas a Alta Presión PIGAP I, instalación adscrita a la Gerencia de Plantas del Distrito Norte de Exploración y Producción Oriente.

3.5 Fuentes de información

Las fuentes a través de las cuales se conseguirá la información, se pueden clasificar en:

3.5.1 Fuentes de información primarias

Observación directa no estructurada y participante de los procesos operacionales del sistema de gas combustible de la Planta de Inyección de Gas a Alta Presión PIGAP I.

Bibliografía especializada en el área de tratamiento de gas, sistemas de turbocompresión, entre otros.

3.5.2 Fuentes de información secundarias

- Manuales, Normas y Procedimientos Corporativos de PDVSA.
- Documentos técnicos de la Gerencia de Plantas del Distrito Norte de PDVSA.
- Históricos del comportamiento de las instalaciones registrados por el CENTINELA y programas de mantenimiento correctivos y preventivos.
- Páginas de Internet.

3.6 Técnicas e instrumentos de recolección de información

Los instrumentos de recolección de datos a emplear en el desarrollo del presente proyecto serán: entrevistas no estructuradas, revisión de documentos y observación directa, por considerarse los métodos más adecuados para recabar la información necesaria.

Las entrevistas no estructuradas serán aplicadas a las personas que manejan los procesos y operaciones relacionados con los diferentes sistemas que componen la Planta de Inyección de Gas a Alta Presión PIGAP I, en particular lo referido al sistema de gas combustible de esta. La entrevista de acuerdo a lo expresado por (Latorre, Rincón y Arnal, 2003) “Es la comunicación interpersonal establecida entre el investigador y el sujeto en estudio a fin de obtener respuestas verbales a las interrogantes planteadas sobre el problema propuesto”. (p. 163). Estas conversaciones de dos o más personas, permitirán exponer opiniones y actitudes por ambas partes, así mismo, servirán para obtener información [14].

De igual manera se utilizará la revisión de documentos, de tipo técnicos, manuales de operación y mantenimiento, normas de PDVSA e internacionales, registros históricos de programas tales como el CENTINELA. Este último es utilizado para monitorear las condiciones de operación de los diferentes equipos que componen las Plantas propiedad de PDVSA.

Según (Latorre, Rincón y Arnal, 2003) se define como: “una técnica en la cual se recurre a información estricta, ya sea bajo la forma de datos que puedan haber sido producto de mediciones hechas por otros, como textos que en si mismos constituyen los eventos de estudio”. (p. 427). Se consideran las bibliografías referentes al tema útiles para la consecución de los objetivos planteados en este proyecto de investigación [14].

Otro instrumento a usar será la observación directa, a través de la cual se buscará recabar la información necesaria, mediante la percepción y la visualización de los hechos, se requiere obtener un análisis de forma directa reflejado por el individuo. Para Fidias (2004) la observación “consiste en el uso sistemático de nuestros sentidos orientados a la capacidad de la realidad que se requiere estudiar”. (p. 55) [15].

En tal sentido podemos afirmar que la percepción del investigador es un elemento que recoge todos aquellos aspectos que pueden estar difusos dentro de la investigación.

3.7. Procedimiento metodológico

3.7.1 Etapa I: Recopilación de la información.

En esta etapa se recopiló la información que sustenta teóricamente la investigación, así como de los antecedentes relacionados con el tema en estudio. Así mismo se ubicaron los datos de operación, funcionamiento y mantenimiento de los equipos involucrados para su análisis. Se consultaron textos, manuales, normas, catálogos, documentos técnicos, páginas de Internet, entre otros. De igual forma se realizaron entrevistas al personal involucrado en las operaciones de PIGAP I.

3.7.2 Etapa II: Descripción y análisis del proceso de tratamiento del gas combustible.

En esta etapa se realizaron visitas a las instalaciones con el apoyo del personal de operaciones de la Planta a los efectos de verificar y levantar mediante diagramas de flujo de proceso los diferentes componentes del sistema de gas combustible de PIGAP I, validando así las condiciones de diseño del mismo (presiones, temperaturas, flujo, composición del gas, entre otras) versus las condiciones actuales de operación. Con esta información se validará el diagrama de flujo de procesos del sistema y las condiciones actuales o reales de operación.

3.7.3 Etapa III: Construcción del proceso en el simulador HYSYS bajo las condiciones de diseño original de la planta.

Una vez levantada la información de la red hidráulica y de proceso para el acondicionamiento del gas combustible de PIGAP I a las condiciones de operación actual, y mediante el análisis comparativo de las especificaciones de diseño de los equipos (hoja de datos, planos de procesos, manual de los equipos, entre otros) que componen el sistema de gas combustible a sus condiciones de diseño original de la planta se construirá el proceso por medio del simulador HYSYS.

3.7.4 Etapa IV: Análisis del sistema de gas combustible bajo las condiciones actuales de operación en el simulador HYSYS.

En esta etapa se realizarán las simulaciones en HYSYS con la finalidad de evaluar el comportamiento de las fuentes al sistema de acondicionamiento de gas combustible para las condiciones actuales de operación. Determinando los equipos o sistemas que operan a condiciones de presión o temperatura críticas o fuera de especificaciones.

3.7.5 Etapa V: Establecer las variables críticas del proceso.

Mediante el análisis comparativo de las especificaciones de diseño de los equipos (hoja de datos, planos de procesos, manual de los equipos, entre otros) que componen el sistema de gas combustible y de condiciones actuales de operación (registros en el CENTINELA, históricos de mantenimiento, entre otros), así como de las simulaciones realizadas en los puntos anteriores, se determinaron las variables críticas del proceso de acuerdo a las fuentes de suministro del gas combustible, es

decir cuales son las variables que mas afectan al sistema de gas combustible y en consecuencia los sistemas de turbocompresión de PIGAP I.

3.7.6 Etapa VI: Identificación de mejoras en el sistema de gas combustible para cumplir con las especificaciones del fabricante.

Una vez realizadas las simulaciones y habiendo evaluado y analizado el sistema de acondicionamiento del gas combustible de PIGAP I, se propondrán las mejoras que permitan cumplir con las especificaciones en cuanto a los parámetros para la normal operación de las turbinas en lo referente a la alimentación del gas combustible.

3.8. Técnicas de análisis de la información

Para el agrupamiento como el tratamiento de los datos que se manejarán en la investigación, será utilizado los programas Microsoft Office, HYSYS 3.2, CENTINELA, por ser las herramientas que nos permitirán obtener la información necesaria y hacer los cálculos correspondientes.

3.9. Tratamiento de la información

Toda la data obtenida producto de la investigación será tabulada, graficada y organizada de manera de facilitar sus análisis. Casi siempre el investigador busca describir las características de la data y posteriormente realizar un análisis de los resultados para inferir sobre las variables en estudio.

Para la representación de los resultados finales, se procederá a presentarlos a través de cuadros, gráficos y figuras debidamente analizados y contrastados con la teoría que sustenta la investigación. En este trabajo se procederá a realizar un análisis descriptivo de las variables y aspectos técnicos de proceso involucrados. Además será cualitativo y cuantitativo, partiendo de los datos reflejados.

CAPITULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Análisis del proceso actual de operación del sistema de gas combustible de la planta de inyección de gas a alta presión PIGAP I

Como se ha descrito, el diseño original de este sistema para la fuente de gas combustible era en un 100% de la descarga del gas de la Planta de Deshidratación de PIGAP I. Sin embargo, posteriormente por consideraciones económicas y operacionales, la fuente de gas combustible de la planta se constituyó por un 60% del gas de retorno de la Planta de Extracción Santa Bárbara y de un 40% de la descarga del gas de la Planta de Deshidratación de PIGAP I (véase Figura 1.1).

Los compresores de gas de PIGAP I son accionados por turbinas a gas modelo MS 5002. Para ello, cada turbina cuenta con un sistema de acondicionamiento de gas denominado “Patín de gas combustible” (véase figura 4.1) cuya función de diseño es proporcionarle al gas las condiciones óptimas para ser empleado como combustible de la turbina [16].

4.1.1. Funcionamiento del patín de acondicionamiento de gas combustible

El gas que llega al patín de acondicionamiento de gas combustible para luego alimentar la turbina es tomado de la línea de 0,3048 m (12 pulg) de succión a los compresores (véase figura 1), el cual posee las siguientes características, Presión 7722,1 kPa (1120 psig), Temperatura 322 K (120 °F), Peso Molecular 20,53 kg/kg

mol y un flujo de 2,29 m³/s (7 MMPCND) (para mayor detalle de instrumentos véase anexo 2):

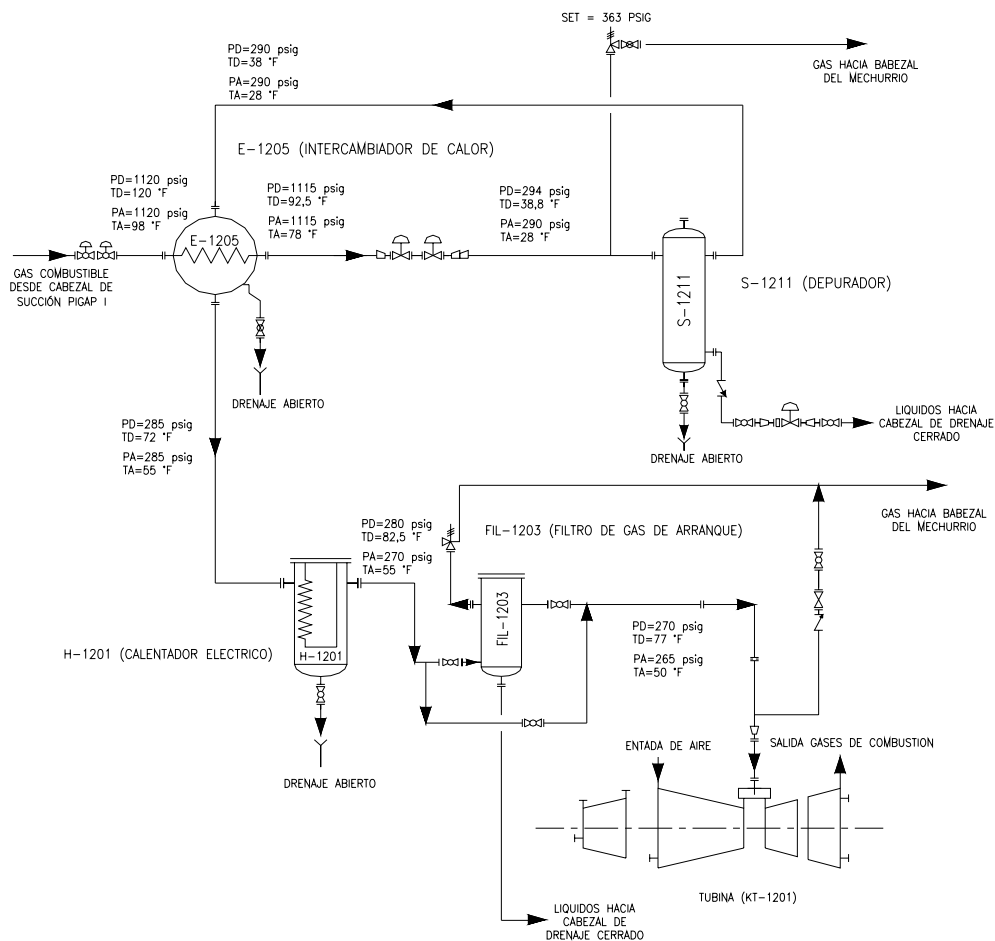


Figura 4.1. Esquemático del patín de Acondicionamiento de gas combustible (SK-1207) de PIGAP I. (fuente PDVSA)

El gas entra al patín de gas combustible SK-1207, previamente deshidratado, a través de una línea de 0,05 m (2 pulg). En esta línea se encuentran los siguientes instrumentos y válvulas:

Válvula de bola manual.

XSV-12011: Válvula de bloqueo, entrada al patín.

PI-12031: Indicador de presión.

TI-12020: Indicador de temperatura.

E-1205: Intercambiador de calor (Gas/Gas)

El intercambiador de calor E-1205 reduce la temperatura de 321,9 K (120 °F) a 306,6 (92,5 °F).

Continuando el gas su recorrido, entra al depurador S-1211 por medio de una línea de 0,05 m (2 pulg) y sale por otra de 0,1016 m (4 pulg) hacia en intercambiador (lado carcaza). En esta última línea se encuentran los siguientes instrumentos:

TI-12021: Indicador de temperatura.

PCV-12033 A/B: Válvula reguladora de presión.

PI-12034: Indicador de presión.

TI-12022: Indicador de temperatura.

PSV-12035: Válvula de seguridad.

S-1211: Depurador.

El gas que sale del intercambiador a 7687,7 kPa (1115 psig) y a una temperatura de 306,6 K (92,5 °F) entra al depurador a una presión de 2027,1 kPa (294 psig) y a una temperatura de 276,9 K (38,8 °F), producto de expansión ocurrida en las válvulas reguladoras de presión PCV-12033 A/B, originando una corriente bifásica (condensado/gas) la cual será separada en el depurador. El condensado (diseñado para un flujo máximo de $106,176 \cdot 10^{-6}$ m³/s o 57,7 barriles/día) será drenado

automáticamente a través de la válvula LCV-12012 hacia el cabezal de líquidos de la planta por una línea de 0,381 m (1 ½ pulg).

El depurador está equipado internamente con un eliminador de neblina (Demister) y dotado de la siguiente instrumentación:

LG-12010:	Indicador de nivel.
LSHH-1201:	Interruptor de alto nivel (paro)
LT-12012:	Transmisor de nivel y alarma de alto/bajo.

El gas libre de partículas líquidas es conducido a lo largo de la línea de 0,1016 m (4 pulg) de retorno hacia el intercambiador de calor E-1205, donde es calentado de 276,9 K (38,8 °F) a la temperatura de 295,37 K (72 °F). Este gas opera como la corriente fría y fluye por la carcasa, es decir por el exterior de los tubos. Luego, fluye a través de una línea de 0,1016 m (4 pulg) hacia el calentador eléctrico H-1201, donde el gas es nuevamente calentado a una temperatura aproximada de 301,2 k (82,5 °F).

El calentador está equipado con los siguientes instrumentos y dispositivos:

TI-12023/24/34:	Indicador de temperatura.
TSH-12034:	Interruptor de alarma por alta temperatura.
TT-12034:	Transmisor de temperatura.
TSHH-12045	Interruptor de alta/alta temperatura.

La temperatura del gas se controla a través de un tablero de control del calentador eléctrico ubicado dentro del centro de control de motores CCM.

Del calentador eléctrico el gas fluye hacia el filtro F-1203 el cual está dotado de los siguientes instrumentos:

LG-1203:	Indicador de nivel.
PI-12039:	Indicador de presión.
PSV-12036:	Válvula de seguridad fijada en 2495,99 kPa (362 psig).
PDI-12037:	Indicador de presión diferencial.
PDSH-12038:	Interruptor de alarma por alto diferencial.

El interno del filtro debe ser reemplazado una vez que la presión diferencial leída por el PDI-12037 llegue a 89,63 kPa (13 psig).

El condensado que se produce en el filtro es drenado manualmente a través de la línea de 0,0254 m (1 pulg) hacia el cabezal de drenaje de la planta.

Entre el filtro del gas combustible y la turbina de gas, en la línea de 0,1016 m (4 pulg), se encuentran los siguientes instrumentos:

TI-12025:	Indicador de temperatura.
PI-12040:	Indicador de presión.
FE-12012:	Elemento de flujo.
FT-12012:	Transmisor de flujo.
PT-12041:	Transmisor de presión.
TT-12026:	Transmisor de temperatura.
TSL-12027:	Interruptor de baja temperatura.

Luego de pasar por el filtro, el gas se encuentra a las condiciones requeridas por el fabricante para el gas combustible de la turbina, es decir:

Presión:	1861,6 kPa (270 psig).
Temperatura:	301,2 K (82,5 °F).
Peso Molecular:	20,42 kg/Kg mol.
Flujo:	2,2941 m ³ /s (7 MMPCND).

4.1.2. Especificaciones de los equipos asociados al patín de gas combustible

Patín de gas combustible (SK-1207/1307/1407/1507/1607), dimensiones: Ancho de 2,8 m (110,23 pulg.), largo de 6 m (236,22 pulg.) y alto de 3,5 m (137,8 pulg.) (véase anexo 3 para ilustraciones de este sistema).

Intercambiador de calor gas/gas (E-1205/1305/1405/1505/1605), tipo de tubo y carcaza, capacidad de 85 kw (0,29 MMBTU/h). Temperatura de la carcaza (entrada/salida) 276,92 K / 295,37 K (38,8 °F / 72 °F), temperatura de los tubos (entrada/salida) 322,03 K / 306,76 K (120 °F / 92,5 °F). Material de los tubos SA-179 y de la carcaza SA-516-60.

Depurador de gas (S1211/1311/1411/1511/1611), presión de diseño 2502,8 kPa (363 psig), temperatura de diseño 243,15 k (-22°F) hasta 353,15 K (176 °F), material SA-516-60. Diámetro interno de 0,386 m (15,21 pulg) y una longitud de 1,7 m (66,93 pulg).

Filtro de gas (FIL1203/1303/1403/1503/1603), tipo cartucho, flujo de diseño 2,01/2,25 kg/s. Presión y temperatura de diseño 2999,2 kPa (435 psig) 259,26 K /

358,15 K (7 °F / 185 °F). Diámetro interno de 0,3048 m (12 pulg) y una longitud de 1,4 m (55,11 pulg).

Calentador eléctrico (H1201/1301/1401/1501/1601), capacidad de 29,87 kw (0,102 MMBTU/h). Presión y temperatura de diseño 2502,8 kPa (363 psig) / 353,15 K (176 °F). Diámetro interno de 0,3048 m (12 pulg) y una longitud de 1,96 m (77,36 pulg).

4.2. Construcción del proceso de acondicionamiento del gas combustible para el caso diseño en el simulador HYSYS (caso diseño)

En el punto 4.1 del presente capítulo se describieron los equipos que componen el patín para el acondicionamiento del gas combustible que alimenta a cada uno de los cinco turbocompresores. Más específicamente en el punto 4.1.1 se describió el comportamiento y características de cada uno de ellos; ahora bien con esta información se procedió a construir el proceso para ser evaluado a las condiciones del diseño original para el acondicionamiento del gas (véase tabla 1 para especificaciones del gas combustible).

Tabla 1. Especificaciones del gas de alimentación para el caso diseño.

Descripción	Diseño
Temperatura, K (°F)	322,03 (120)
Presión, kPa (Psig)	7722,1 (1120)
Flujo, m ³ /s (MMPCND)	2,32 (7,09)
Gravedad Específica	0,6872

Nota. Tabla elaborada con datos del Diagrama de Flujo de Procesos del acondicionamiento del patín de gas combustible.

Como elemento de partida se consideró que los trenes de compresión pueden operar con tres diferentes casos de composición del gas en términos de riqueza o GPM (véase tabla 2 para casos más bajo, normal y más alto). Siendo el caso normal el evaluado para el caso diseño [16].

Tabla 2. Cromatografía del gas de alimentación para el caso diseño (componentes en % Molar).

Componente	Caso más bajo	Caso normal	Caso más alto
Peso Molecular	20,53	20,99	21,46
N2	0,078	0,055	0,510
CO2	6,180	6,367	6,438
C1	81,200	81,114	78,504
C2	8,580	8,460	7,932
C3	2,102	2,713	3,928
iC4	0,454	0,588	0,663
nC4	0,590	0,749	1,020
iC5	0,244	0,280	0,330
nC5	0,197	0,230	0,274
C6	0,277	0,287	0,306
C7	0,067	0,125	0,077
C8	0,013	0,022	0,011
C9	0,008	0,033	0,007
C10	0,100	0,007	0,000
GPM C3+	1,23	1,56	1,99
lbH2O/MMPCND	5,00	5,00	5,00
P.P.M. H2S	12-30	12-30	12-30

Nota. Tabla elaborada con datos del Diagrama de Flujo de Procesos del acondicionamiento del patín de gas combustible.

Con esta información se procedió a crear el modelo para el caso diseño utilizando como herramienta el simulador HYSYS, obteniéndose los siguientes resultados:

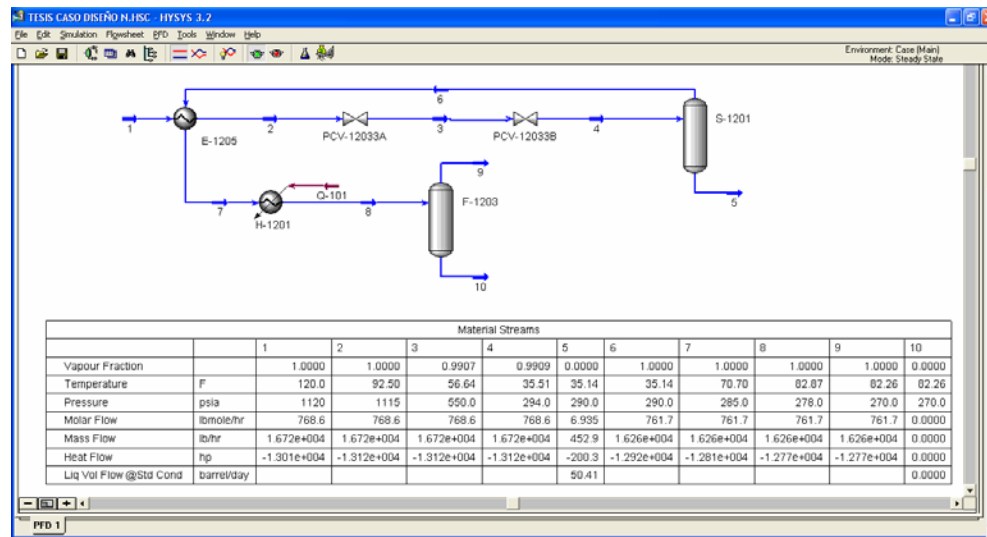


Figura 4.2. Modelo de simulación del patín de Acondicionamiento de gas combustible (SK-1207) de PIGAP I, Caso Diseño.

En la figura 4.2, se muestra el diagrama de flujo de proceso y el resumen de las propiedades físico-químicas de las diferentes corrientes; mediante el análisis de resultados se corroboró que después de la expansión ocurrida en las válvulas reguladoras de presión PCV-12033 A/B desde una presión de 7722,1 kPa (1120 psig) hasta 2027,13 kPa (294 psig) se inicia la formación de líquidos que son separadas y drenadas completamente por el Depurador S-1201.

El diagrama de fases de Presión-Temperatura (P y T) del gas combustible que ingresa a la cámara de combustión de la turbina indica que no existe entrada de líquidos al equipo (véase figura 4.3). De igual forma se verificó que las condiciones de ésta corriente se encuentran dentro de los parámetros establecidos por el fabricante de los turbocompresores.

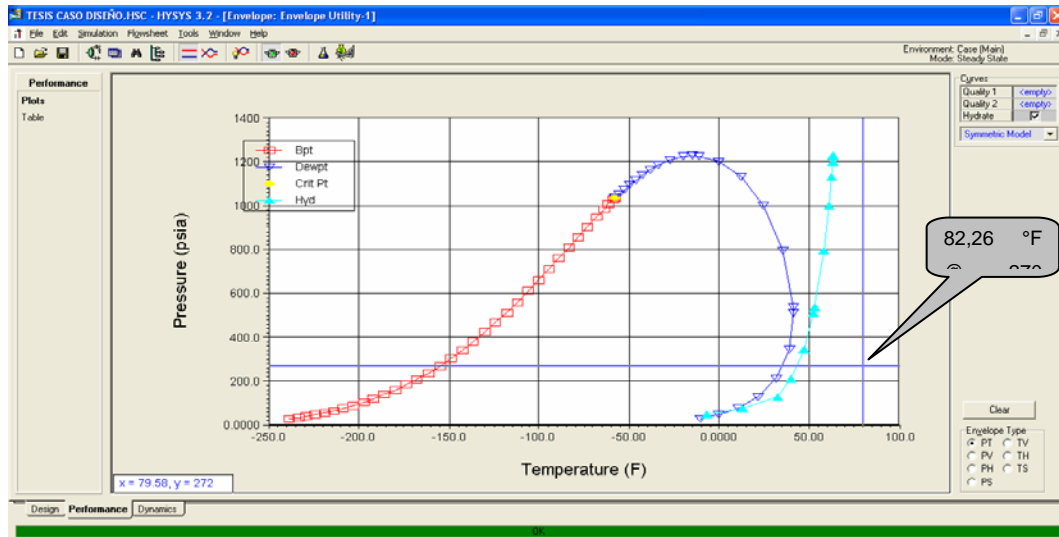


Figura 4.3. Envoltura de fase caliente 9 (Alimentación de la Cámara de Combustión), Caso Diseño.

Por otra parte, las temperaturas obtenidas aguas debajo de las válvulas de expansión PCV-12033 A/B, de 284,62 K y 274,95 K (52,9 °F y 35,51 °F) respectivamente son superiores a la temperatura de solidificación del vapor de agua presente en el aire (273,15 K o 32°F) por lo que no se presenta la formación de hielo alrededor de las válvulas.

Adicionalmente se evaluó con el simulador la posible formación de hidratos en cada una de las corrientes, arrojando como resultados que en las corrientes 4, 5 y 6 podrían formarse hidratos solo en caso de que exista agua libre; condición que no existe por la eficiencia en los equipos y sistemas de deshidratación de la fuente del gas combustible (véase figura 4.2). Para el caso del sistema de PIGAP I, el sistema de deshidratación es triple redundante por lo que se espera cero agua en la corriente de gas que va hacia el sistema de compresión.

Con lo anteriormente descrito se pudo comprobar el modelo de simulación para las condiciones de diseño del sistema de gas combustible fue satisfactorio, solo se

obtuvo una desviación del 0,3% respecto de la temperatura, por cuanto la misma debió ser 301,07 K (82,5 °F), siendo el resultado obtenido de 300,94 K (82,26 °F), y de 0% de desviación respecto a la presión, atribuyéndose este error a la posible variación en la composición del gas de alimentación.

4.3. Análisis del sistema de gas combustible bajo las condiciones actuales de operación en el simulador HYSYS (caso operación actual)

En el punto anterior se construyó el modelo del proceso de acondicionamiento del gas combustible para el caso de operación a condiciones de diseño. Sin embargo, producto de cambios operacionales se modificó la fuente de alimentación del gas combustible, en consecuencia los parámetros de operación de la fuente de alimentación del gas combustible difieren significativamente de los parámetros originales de operación.

La modificación de las facilidades para la alimentación del sistema de gas combustible consistió en el desvío de parte del flujo manejado por el Complejo Muscar (véase figura 2.1, Esquemático de Operación Complejo Muscar) hacia la Planta de Extracción Santa Bárbara, a los efectos de obtener la mayor cantidad de líquidos, los cuales tienen un importante valor económico para la empresa. Retornando luego este gas pobre hacía PIGAP I y en consecuencia distribuida hacia la alimentación del sistema de gas combustible que surte a cada uno de los cinco turbocompresores bajo otras condiciones.

Este cambio significó que el volumen total manejado por los sistemas de compresión de PIGAP I se constituya por un 60% del gas proveniente del retorno de la Planta de Extracción Santa Bárbara y de un 40% de la descarga del gas de la Planta de Deshidratación de Alta Presión de PIGAP I.

Ahora bien, con la composición de mezcla generada se procedió a la creación del modelo respectivo. Para ello se tomaron las condiciones actuales de operación de la alimentación del gas combustible luego de ser mezclados en el cabezal de succión del sistema de compresión, arrojando la información que se muestra de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 3. Especificaciones del gas de alimentación para el caso operación actual.

Descripción	Diseño
Temperatura, K (°F)	310,92 (100)
Presión, kPa (Psig)	7763,77(1126)
Flujo, m ³ /s (MMPCND)	2,32 (7,09)
Gravedad Específica	0,6872

Nota. Tabla elaborada con datos tomados del patín de gas combustible.

Como se puede observar existe una variación importante en cuanto a la temperatura y presión de la corriente de alimentación del gas combustible, la cual pasa de 120 °F (caso diseño) a 100 °F y de 7722,1 kPa (1120 psig) a 7763,77 kPa (1126 psig). Así mismo la composición del gas producto de la mezcla de ambas corrientes presenta variaciones tal como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Cromatografía del gas de alimentación para el caso operación actual (componentes en % Molar).

Cabezal de Succión PIGAP-I			
Componente	Gas de retorno Santa Bárbara	Gas Desh. Alta Presión	Entrada Patín de Gas Combustible
Peso Molecular	18,8	20,46	19,88
N2	0,166	0,027	0,046
CO2	4,868	5,698	5,415
C1	85,710	81,673	83,142
C2	8,769	8,286	8,236
C3	0,438	2,144	1,795
iC4	0,020	0,480	0,337
nC4	0,020	0,664	0,460
iC5	0,004	0,231	0,153
nC5	0,003	0,185	0,119
C6	0,002	0,182	0,109
C7	0,001	0,127	0,078
C8	0,000	0,023	0,018
C9	0,000	0,007	0,002
C10	0,000	0,002	0,000
GPM C3+	1,23	1,56	1,99
lbH2O/MMPCND	0,00	0,00	0,00
P.P.M. H2S	15	15	15

del

La figura 4.4 muestra el modelo (diagrama de flujo de proceso) en el simulador HYSYS para el caso operacional actual y la tabla resumen de las propiedades físico-químicas de las diferentes corrientes.

El modelo permitió evaluar el comportamiento de toda la red de equipos del sistema de gas combustible con la fuente actual de suministro a las condiciones actuales de operación en cuanto a presión, temperatura y composición del gas, esto incluye modelar la red sin que este en funcionamiento el calentador H-1201.

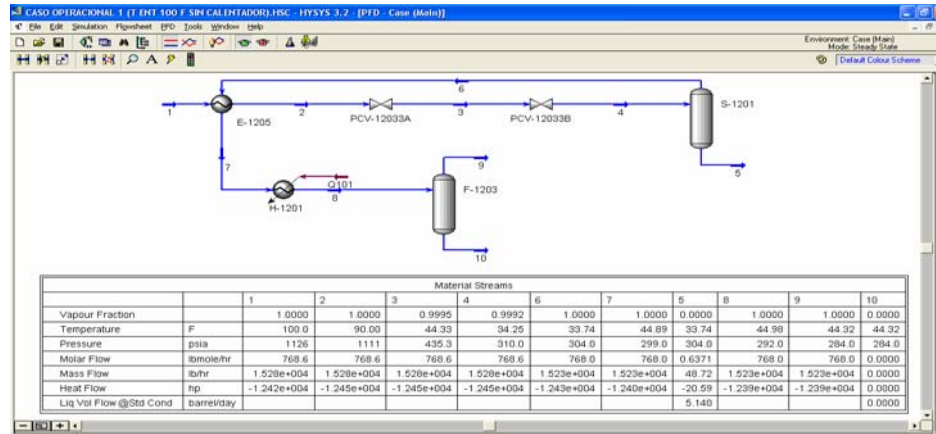


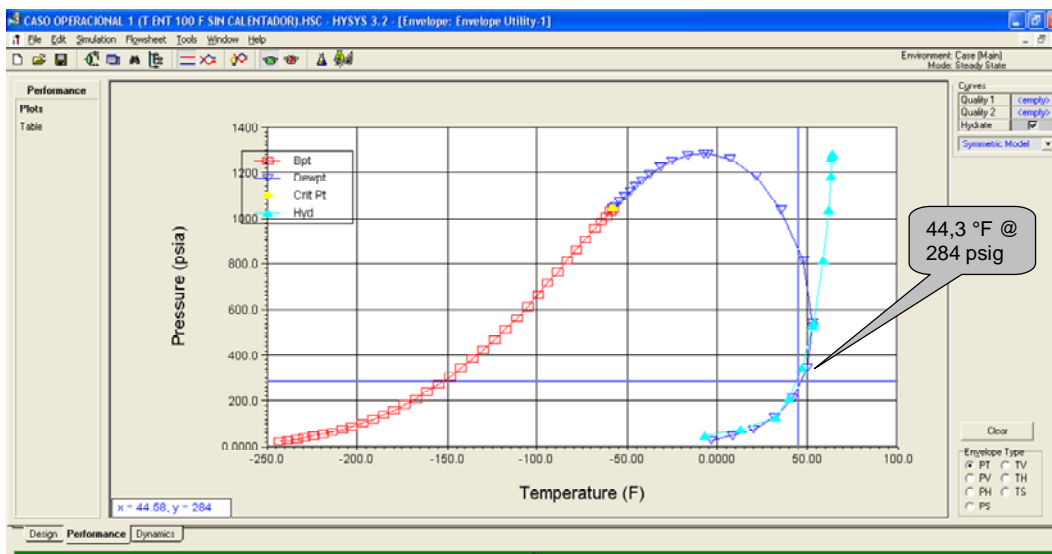
Figura 4.4. Modelo de simulación del patín de Acondicionamiento de gas combustible (SK-1207) de PIGAP I, Caso operación actual.

Mediante el análisis de resultados se determinó que luego de la expansión ocurrida en las válvulas reguladoras de presión (PCV-12033 A/B) desde una presión de 7763,5 kPa (1126 psig) hasta 2137,4 kPa (310 psig) se inicia la formación de líquidos a razón de $9,458.10E-6$ m³/s (5,14 barriles por día), enviados al depurador. Sin embargo la condición más crítica se presenta por efectos de la temperatura, la cual luego de la expansión alcanza valores (274,25 K o 34,25 °F) cercanos al punto de solidificación del vapor de agua presente en el aire, esto hace que se forme una fina capa de hielo alrededor de la válvula.

La formación de hielo alrededor de las válvulas reguladoras de presión (véase anexo 5) hace que las mismas no operen de acuerdo a las especificaciones y/o valores deseados. Esto trae como consecuencia la acumulación de líquidos en el depurador y en consecuencia activa los sensores de nivel es este equipo.

En cuanto al diagrama de fases de Presión-Temperatura (P y T) del gas combustible que ingresa a la cámara de combustión de la turbina, este indica que no

existe entrada de líquidos al equipo (véase figura 4.5). No obstante el punto de operación del gas combustible que va hacia la cámara de combustión se encuentra muy cerca del punto de rocío, es decir próximo a formarse la mezcla líquido-vapor, por lo que cualquier descenso de temperatura por condiciones operacionales o ambientales puede hacer que entre vapor o condensados a la cámara de combustión.



De igual forma se verificó que las condiciones de esta corriente se encuentran fuera de los parámetros establecidos por el fabricante de los turbocompresores (véase tabla 5), por lo que el proceso de quema del combustible dentro de la cámara de combustión será deficiente ocasionando paros en los turbocompresores.

Tabla 5. Condiciones de operación para el caso diseño vs. actual.

	Descripción	Diseño	Operación	Desviación, %
Entrada Patín de Gas Combustible	Temperatura, K (°F)	321,93 (120)	310,8 (100)	16,67
	Presión, kPa (Psig)	7722,4 (1120)	7763,7 (1126)	0,54
Salida Patín de Gas Combustible	Temperatura, K (°F)	301,07 (82,5)	279,85 (44,32)	46,28
	Presión, kPa (Psig)	1861,65 (270)	1958,18 (284)	5,19

4.4. Establecer las variables críticas del proceso de acondicionamiento del gas combustible

Como se ha descrito anteriormente, el diseño original de este sistema para la fuente de gas combustible era en un 100% de la descarga del gas de la Planta de Deshidratación de PIGAP I. Sin embargo, posteriormente por consideraciones económicas y operacionales, la fuente de gas combustible de la planta, se constituyó por un 60% del gas de retorno de la Planta de Extracción Santa Bárbara y de un 40% de la descarga del gas de la Planta de Deshidratación de PIGAP I.

Por otra parte, al analizar las estadísticas de fallas luego del cambio en las condiciones de entrada del gas (producto de la mezcla) a los sistemas de compresión de PIGAP I, se observa que el 10% del total se debe a fallas presentadas por los equipos que componen el patín de gas combustible (véase anexo 6). Este 10%, se desglosa en lo siguiente: 5,31% por falla de control/accionamiento de las válvulas de control, 3,54% por alto nivel de líquidos en el depurador y 0,88% por fallas en la combustión, es decir en todos los casos anteriores el gas combustible no alcanza las condiciones requeridas para el proceso de combustión.

Con la finalidad de evaluar el comportamiento de las fuentes de suministro de gas combustible en el sistema de acondicionamiento actual, se tomaron mediciones

en campo tanto de presión como de temperatura para el período comprendido entre los meses de Marzo y Abril del presente año, siendo los valores obtenidos los que se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 6. Comportamiento de Presión y Temperatura a la entrada del patín de acondicionamiento de gas para el mes de Marzo del 2009.

Mes	Temperatura, °F		Desviación, %	Presión, Psig		Desviación, %
	Real	Diseño		Real	Diseño	
01	101	120	15,8	1118	1120	0,2
02	102	120	15,0	1122	1120	0,2
03	104	120	13,3	1120	1120	0,0
04	103	120	14,2	1118	1120	0,2
05	105	120	12,5	1123	1120	0,3
06	103	120	14,2	1115	1120	0,4
07	108	120	10,0	1116	1120	0,4
08	100	120	16,7	1118	1120	0,2
09	103	120	14,2	1120	1120	0,0
10	103	120	14,2	1119	1120	0,1
11	102	120	15,0	1121	1120	0,1
12	101	120	15,8	1120	1120	0,0
13	102	120	15,0	1122	1120	0,2
14	101	120	15,8	1121	1120	0,1
15	101	120	15,8	1119	1120	0,1
16	101	120	15,8	1117	1120	0,3
17	100	120	16,7	1119	1120	0,1
18	101	120	15,8	1122	1120	0,2
19	100	120	16,7	1125	1120	0,4
20	100	120	16,7	1126	1120	0,5
21	100	120	16,7	1119	1120	0,1
22	101	120	15,8	1120	1120	0,0
23	101	120	15,8	1122	1120	0,2
24	101	120	15,8	1121	1120	0,1
25	102	120	15,0	1120	1120	0,0
26	101	120	15,8	1121	1120	0,1
27	100	120	16,7	1120	1120	0,0
28	92	120	23,3	1119	1120	0,1
29	89	120	25,8	1118	1120	0,2
30	87	120	27,5	1120	1120	0,0
31	86	120	28,3	1121	1120	0,1

Tabla 7. Comportamiento de Presión y Temperatura a la entrada del patín de acondicionamiento de gas para el mes de Abril del 2009.

Mes	Temperatura, °F		Desviación, %	Presión, Psig		Desviación, %
	Abril	Real		Diseño	Real	
01	84	120	30,0	1120	1120	0,0
02	84	120	30,0	1119	1120	0,1
03	89	120	25,8	1121	1120	0,1
04	91	120	24,2	1118	1120	0,2
05	99	120	17,5	1122	1120	0,2
06	100	120	16,7	1119	1120	0,1
07	102	120	15,0	1117	1120	0,3
08	100	120	16,7	1118	1120	0,2
09	102	120	15,0	1119	1120	0,1
10	103	120	14,2	1121	1120	0,1
11	101	120	15,8	1120	1120	0,0
12	105	120	12,5	1118	1120	0,2
13	105	120	12,5	1119	1120	0,1
14	106	120	11,7	1120	1120	0,0
15	103	120	14,2	1122	1120	0,2
16	100	120	16,7	1120	1120	0,0
17	101	120	15,8	1122	1120	0,2
18	99	120	17,5	1119	1120	0,1
19	100	120	16,7	1121	1120	0,1
20	102	120	15,0	1120	1120	0,0
21	103	120	14,2	1119	1120	0,1
22	102	120	15,0	1121	1120	0,1
23	101	120	15,8	1120	1120	0,0
24	100	120	16,7	1118	1120	0,2
25	102	120	15,0	1120	1120	0,0
26	103	120	14,2	1122	1120	0,2
27	100	120	16,7	1119	1120	0,1
28	102	120	15,0	1117	1120	0,3
29	106	120	11,7	1120	1120	0,0
30	105	120	12,5	1119	1120	0,1

De las tablas 6 y 7 para el período estudiado, se muestra que la propiedad que sufre mayor variación es la correspondiente a la Temperatura, siendo el valor promedio el de 310,77 K (100 °F), valor más alto de 315,25 K (108 °F) y el más bajo de 301,91 K (84 °F); presentándose este último bajo condiciones de lluvia, es decir se alcanza este valor cuando existen condiciones tanto operaciones o internas como externas, tales como crecida de cauce del río por donde pasa el gasoducto de gas de retorno de la planta de extracción Santa Bárbara.

Ahora bien, con la finalidad de determinar el efecto de las fuentes de suministro de gas combustible en el sistema de acondicionamiento actual, se evaluaron diferentes escenarios a los efectos de validar si con estas condiciones se logra cumplir con lo exigido por las especificaciones del fabricante de las turbinas a gas modelo MS 5002. En los dos primeros escenarios se plantea el análisis de las fuentes por separado, es decir en caso de un evento en los gasoductos o sistemas de alimentación hacia el sistema de gas combustible, ya que este debe ser capaz de operar con la fuente que quede disponible. El tercer escenario plantea el análisis del sistema con las condiciones actuales de operación (producto de la mezcla), por lo tanto, los casos evaluados fueron:

Escenario 1. Sistema de gas combustible con fuente Deshidratación Santa Bárbara a 7722 kPa (1120 psig) y 299,81 K (80 °F).

Escenario 2. Sistema de gas combustible con fuente Deshidratación PIGAP I a 7722 kPa (1120 psig) y 324,26 K (124 °F).

Escenario 3. Sistema de gas combustible con fuente (mezcla actual) a 7722 kPa (1120 psig) y 310,92 K (100 °F).

4.4.1. Escenario 1. Sistema de gas combustible con fuente de alimentación Deshidratación Santa Bárbara a 7722,1 kPa (1120 Psig) y 299,81 K (80 °F).

Consistió en evaluar el comportamiento de toda la red de equipos del sistema de gas combustible con la fuente de suministro del gas de retorno de la Planta de Extracción Santa Bárbara, el cual es predominantemente seco, con un poder calorífico de 38518,61 kJ/m³ (1034 BTU/ft³), un GPM de 0,14 y una gravedad específica de 0,649. Las condiciones de operación para este escenario son de acuerdo a la tabla anexa:

Tabla 8. Especificaciones del gas de alimentación del escenario 1.

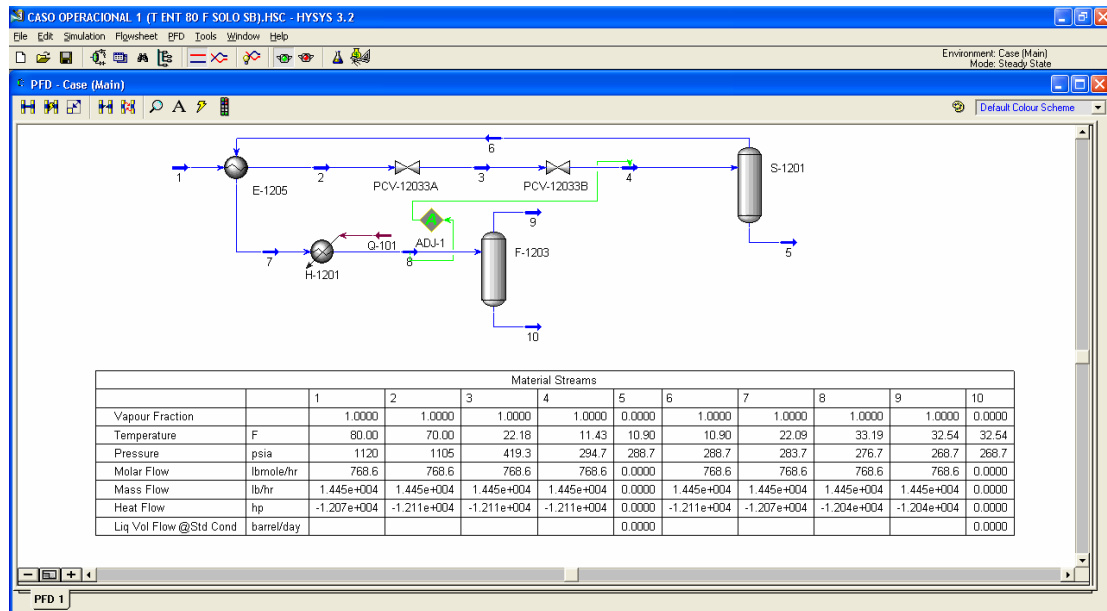
Descripción	Diseño
Temperatura, K (°F)	299,66 (80)
Presión, kPa (Psig)	7722,1(1120)
Flujo, m ³ /s (MMPCND)	2,32 (7,09)
Gravedad Específica	0,649

En cuanto a la composición del gas de retorno de la Planta de Extracción Santa Bárbara, la misma será conforme a la tabla 4.

La figura 4.6 muestra el modelo (diagrama de flujo de proceso) en el simulador HYSYS para el escenario en estudio y la tabla resumen de las propiedades físico-químicas de las diferentes corrientes.

Este escenario permitió evaluar el comportamiento de toda la red de equipos del sistema de gas combustible solo con la fuente de la Planta de Extracción Santa

Bárbara a las condiciones de descarga de la planta en cuanto a presión, temperatura y composición del gas.



Mediante el análisis de resultados se determinó que luego de la expansión ocurrida en las válvulas reguladoras de presión (PCV-12033 A/B) desde una presión de 7722,1 kPa (1120 psig) hasta 2027,1 kPa (294 psig), la temperatura disminuyó hasta los 261,48 K (11 °F). Es decir muy por debajo al punto de solidificación del vapor de agua presente en el aire, (273,15 K o 32 °F), lo que hace que se forme hielo alrededor de la válvula. El hielo presente en las válvulas reguladoras de presión ocasiona que los actuadores de las mismas no operen satisfactoriamente.

En cuanto al diagrama de fases de Presión-Temperatura (P y T) del gas combustible que ingresa a la cámara de combustión de la turbina, este indica que no existe entrada de líquidos al equipo (véase figura 4.7).

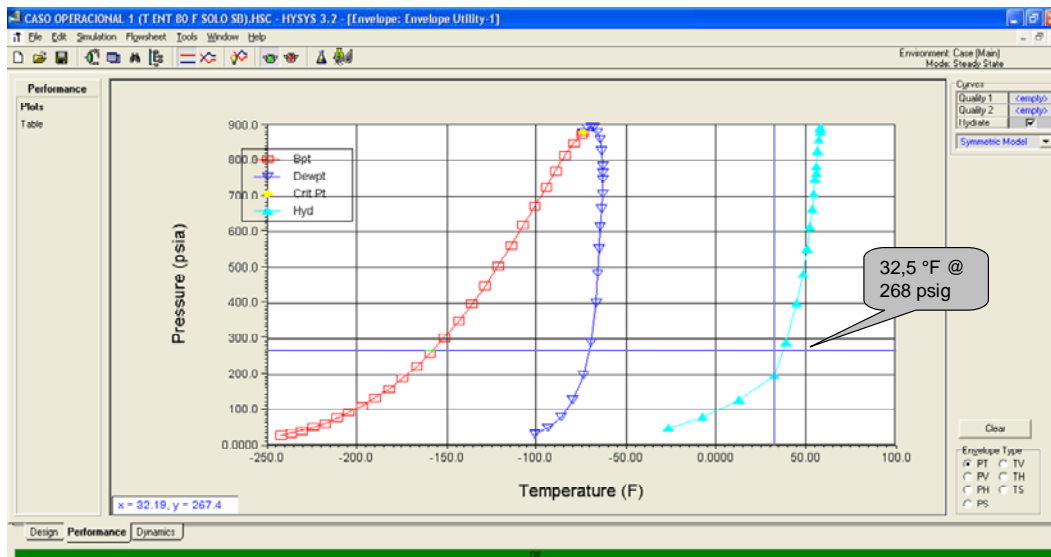


Figura 4.7. Envoltura de fase corriente 9 (Alimentación de la Cámara de Combustión), Escenario 1.

De igual forma se verificó que las condiciones de esta corriente se encuentran fuera de los parámetros establecidos por el fabricante de los turbocompresores, por lo que el proceso de quema del combustible dentro de la cámara de combustión sería deficiente al no alcanzarse la temperatura adecuada para la alimentación del gas combustible.

4.4.2. Escenario 2. Sistema de gas combustible con fuente de alimentación Deshidratación PIGAP I a 7722,1 kPa (1120 Psig) y 324,26 K (124 °F).

Consistió en evaluar el comportamiento de toda la red de equipos del sistema de gas combustible con la fuente de suministro del gas de Deshidratación de PIGAP I, con un poder calorífico de 41126,26 kJ/m³ (1104 BTU/ft³), un GPM de 1,33 y una

gravedad específica de 0,707. Las condiciones de operación para este escenario son de acuerdo a la tabla anexa:

Tabla 9. Especificaciones del gas de alimentación del escenario 2.

Descripción	Diseño
Temperatura, K (°F)	324,26 (124)
Presión, kPa (Psig)	7722,1(1120)
Flujo, m3/s (MMPCND)	2,32 (7,09)
Gravedad Específica	0,707

En cuanto a la composición del gas de Deshidratación de PIGAP I, la misma será conforme a lo indicado en la tabla 4.

En la figura 4.8 se muestra el modelo (diagrama de flujo de proceso) en el simulador HYSYS para el escenario en estudio y la tabla resumen de las propiedades físico-químicas de las diferentes corrientes.

Este escenario permitió evaluar el comportamiento de toda la red de equipos del sistema de gas combustible solo con la fuente de Deshidratación de PIGAP I a las condiciones de descarga de la planta en cuanto a presión, temperatura y composición del gas.

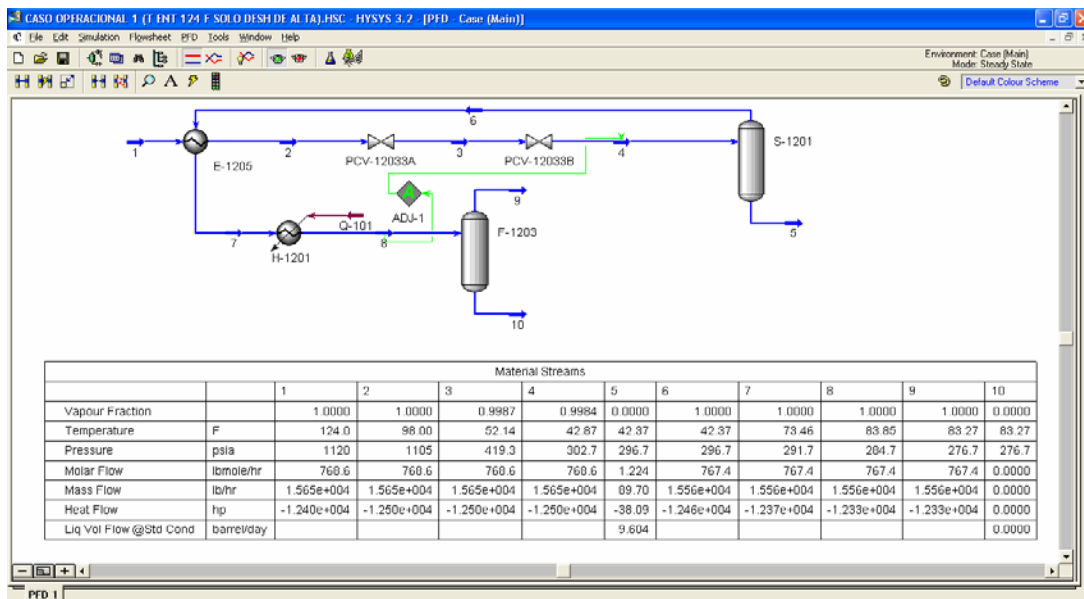


Figura 4.8. Modelo de simulación del Escenario 2.

En la figura 4.8, se muestra el diagrama de flujo de proceso y el resumen de las propiedades físico-químicas de las diferentes corrientes. Mediante un análisis de los resultados se verificó que después de la expansión ocurrida en las válvulas reguladoras de presión PCV-12033 A/B desde una presión de 7722,1 kPa (1120 psig) hasta 2082,2 kPa (302 psig) se inicia la formación de líquidos a razón de 0,176.10E-6 m³/s (9,6 barriles por día), manejadas por el Depurador S-1201.

El diagrama de fases de Presión-Temperatura (P y T) del gas combustible que ingresa a la cámara de combustión de la turbina indica que no existe entrada de líquidos al equipo (véase figura 4.9). De igual forma se validó que las condiciones de esta corriente se encuentran dentro de los parámetros establecidos por el fabricante.

En cuanto al diagrama de fases de Presión-Temperatura (P y T) del gas combustible que ingresa a la cámara de combustión de la turbina, este indica que no existe entrada de líquidos al equipo (véase figura 4.9).

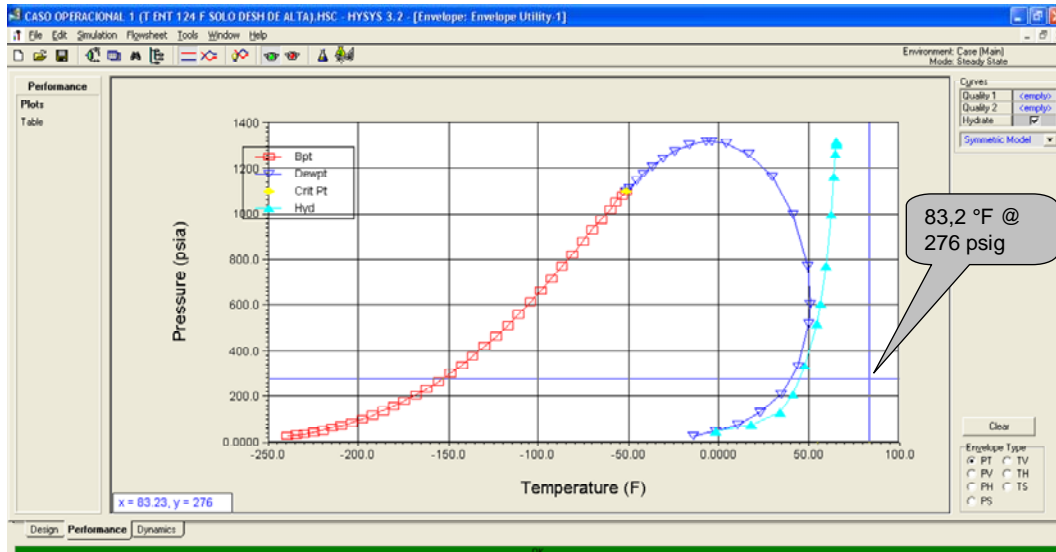


Figura 4.9. Envoltura de fase corriente 9 (Alimentación de la Cámara de Combustión), Escenario 2.

Por otra parte, las temperaturas obtenidas aguas debajo de las válvulas de expansión PCV-12033 A/B (284,33 K y 279,18 K (52,14 °F y 42,87 °F) respectivamente) son superiores a la temperatura de solidificación del vapor de agua presente en el aire (273,15 K o 32°F) por lo que no se presentaría la formación de hielo alrededor de las válvulas.

En cuanto a los valores o resultados de los parámetros de operación del sistema de gas combustible para este escenario cabe destacar que son muy cercanos a los del caso diseño, por cuanto para este último, la fuente de alimentación del gas combustible era solo la de Deshidratación PIGAP I. No obstante, la composición del gas ha cambiado y a ello se le atribuye esa diferencia.

4.4.3. Escenario 3. Sistema de gas combustible con fuente de alimentación mezcla actual a 7722 kPa (1120 Psig) y 310,9 K (100 °F).

Consistió en evaluar el comportamiento de diseño de toda la red de equipos del sistema de gas combustible con la fuente actual de suministro, es decir el gas de, la Planta de Deshidratación PIGAP I y el retorno de la Planta de Extracción Santa Bárbara, con un poder calorífico de 40232,21 kJ/m³ (1080 BTU/ft³), un GPM de 0,94 y una gravedad específica de 0,687. Las condiciones de operación para este escenario son:

Tabla 10. Especificaciones del gas de alimentación del escenario 3.

Descripción	Diseño
Temperatura, K (°F)	310,92 (100)
Presión, kPa (Psig)	7722,1(1120)
Flujo, m ³ /s (MMPCND)	2,32 (7,09)
Gravedad Específica	0,687

La figura 4.10 muestra el modelo (diagrama de flujo de proceso) en el simulador HYSYS para el escenario 3 y la tabla resumen de las propiedades físico-químicas de las diferentes corrientes.

El modelo permitió evaluar el comportamiento de toda la red de equipos del sistema de gas combustible con la fuente actual de suministro a las condiciones actuales de operación en cuanto a presión, temperatura y composición del gas, esto incluye modelar la red con el calentador H-1201 en funcionamiento.

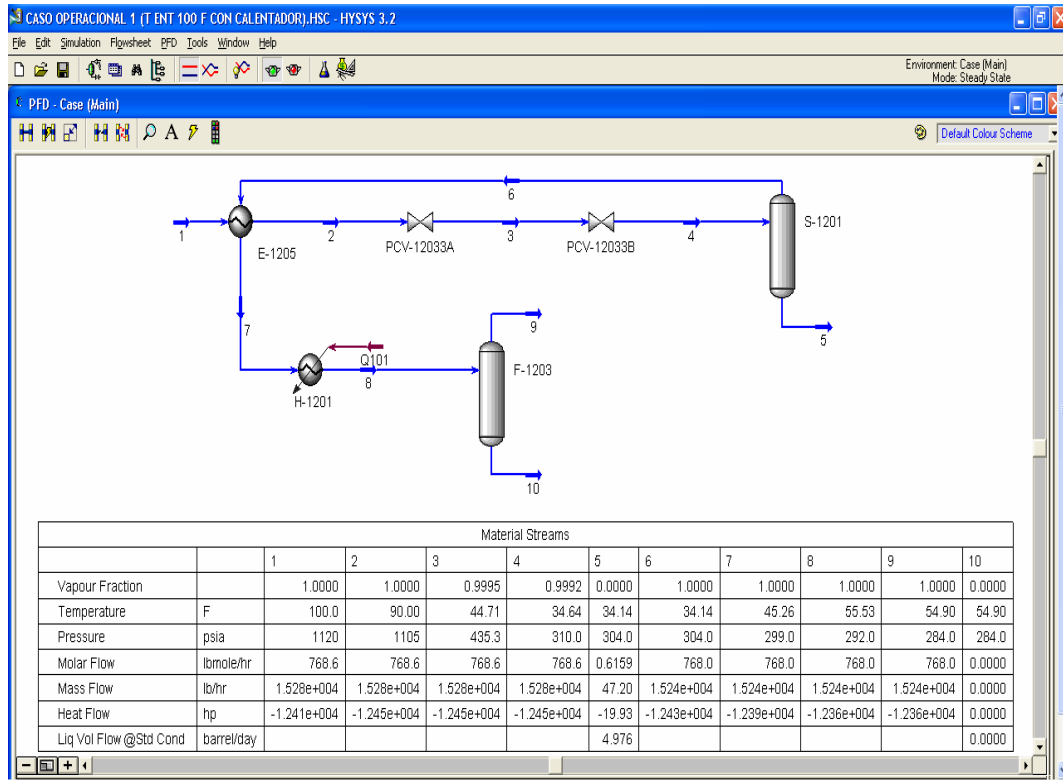


Figura 4.10. Modelo de simulación del Escenario 3.

Con el análisis de resultados se determinó que luego de la expansión ocurrida en las válvulas reguladoras de presión (PCV-12033 A/B) desde una presión de de 7722,1 kPa (1120 psig) hasta 2137,4 kPa (310 psig) se inicia la formación de líquidos a razón de $9,14 \cdot 10^{-6}$ m³/s (4,97 barriles por día), enviados al depurador. Sin embargo la condición más crítica se presenta por efectos de la temperatura, la cual luego de la expansión alcanza valores (274,14 K o 34,14 °F) cercanos al punto de solidificación del vapor de agua presente en el aire, por lo que hay grandes posibilidades de que se forme hielo alrededor de las válvulas y como ya se ha descrito, esto hace que las mismas no operen de forma adecuado, con el posible incremento del nivel de líquidos en el depurador.

El diagrama de fases de Presión-Temperatura (P y T) del gas combustible que ingresa a la cámara de combustión de la turbina, indica que no existe entrada de líquidos al equipo (véase figura 4.11).

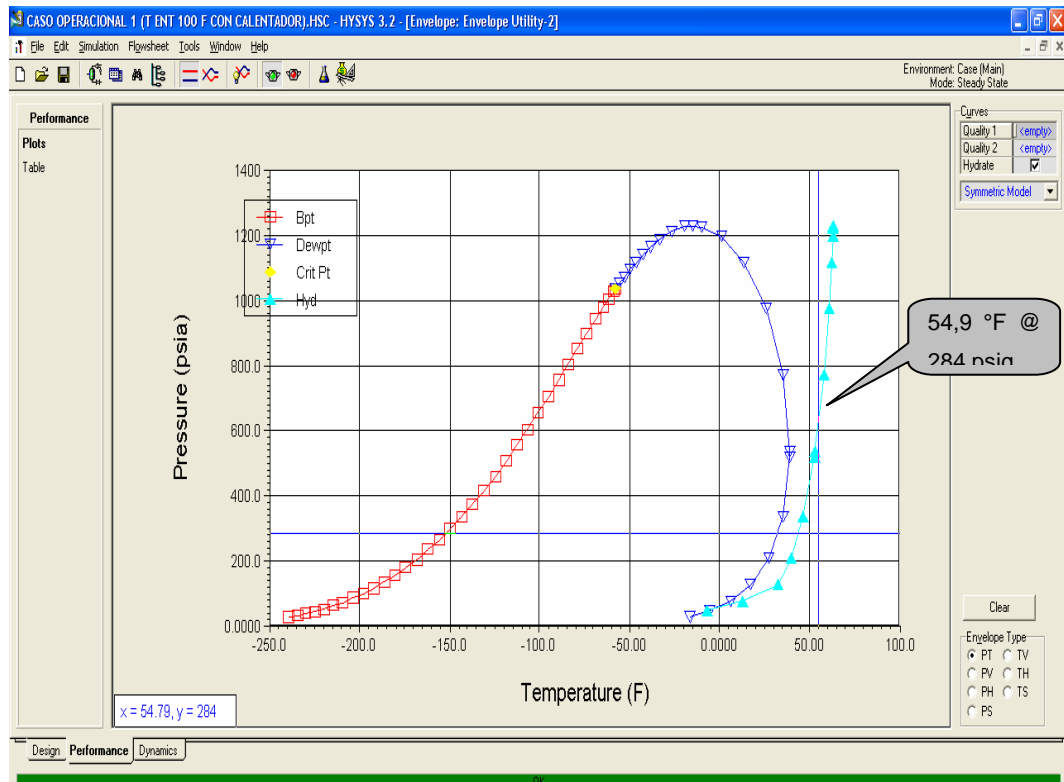


Figura 4.11. Envoltente de fase corriente 9 (Alimentación de la Cámara de Combustión), Escenario 3.

De igual forma se verificó que las condiciones de esta corriente se encuentran fuera de los parámetros establecidos por el fabricante de los turbocompresores, principalmente el valor de la temperatura. Por lo que el proceso de quema del combustible dentro de la cámara de combustión será deficiente ocasionando posibles paros en los turbocompresores.

4.5. Identificación de mejoras en el sistema de gas combustible para cumplir con las especificaciones del fabricante

Una vez realizadas las simulaciones y habiendo evaluado y analizado el sistema de acondicionamiento del gas combustible de PIGAP I, se proponen a continuación mejoras que permitan cumplir con las especificaciones en cuanto a los parámetros para la normal operación de las turbinas en lo referente a la alimentación del gas combustible, específicamente en lo relativo a las bajas temperaturas en la entrada del patín.

En vista de que la temperatura que más afecta el sistema de gas combustible es el de la fuente de la Planta de Extracción Santa Bárbara, se plantea la posibilidad de instalar un calentador que permita elevar la temperatura a un nivel tal que al mezclarse con la fuente de Deshidratación de PIGAP I alcance el valor deseado (322,03 K o 120 °F).

La primera propuesta consiste en la instalación de un calentador a la entrada de cada patín de acondicionamiento del gas combustible, en la figura 4.12 se muestra el diagrama de flujo de proceso para este caso.

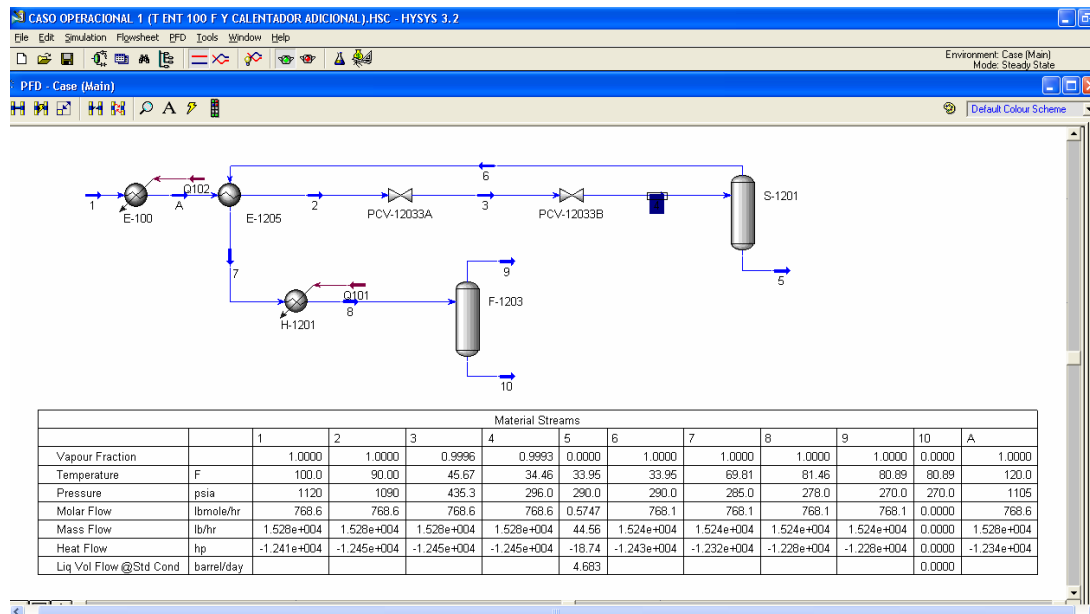


Figura 4.12. Modelo de simulación, mejoras al sistema caso 1.

Sin embargo el problema de la baja temperatura luego de las expansiones de las válvulas PCV-12033A/B persiste y en consecuencia se formará hielo. El cual altera el buen funcionamiento de estas.

Otra alternativa consiste en la instalación de un calentador ubicado entre el calentador existente (E-1205) y las válvulas reguladoras de presión, a los efectos de incrementar la temperatura antes del proceso de expansión en las válvulas PCV 12033A/B.

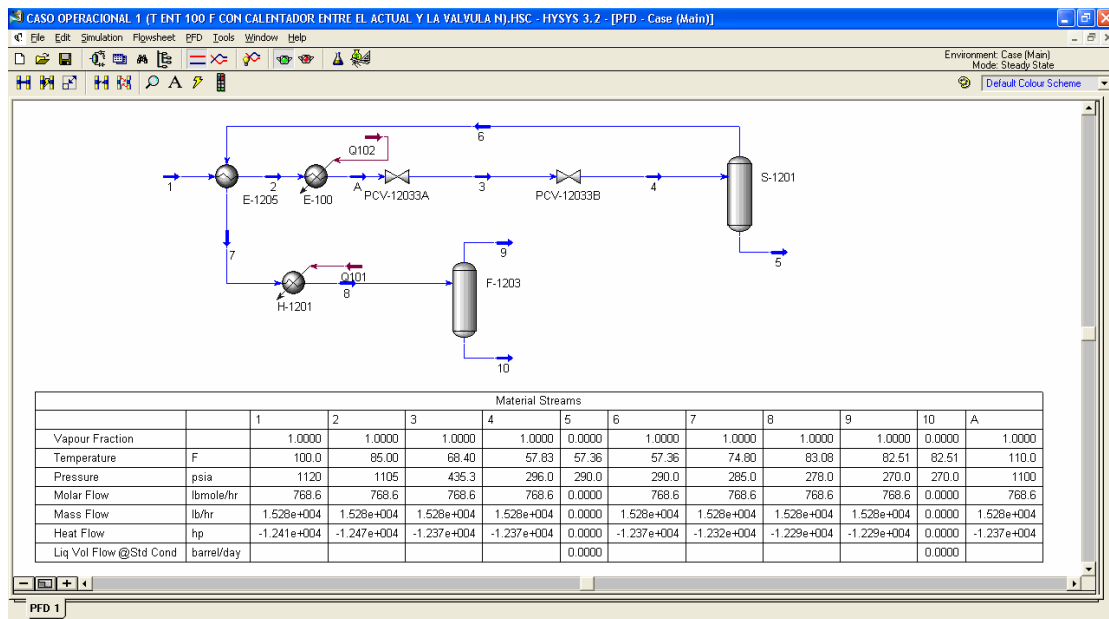


Figura 4.13. Modelo de simulación, mejoras al sistema caso 2.

En la figura 4.13, se muestra el diagrama de flujo de proceso y el resumen de las propiedades físico-químicas de las diferentes corrientes para este caso; en la cual se verificó que después de la expansión ocurrida en las válvulas reguladoras de presión PCV-12033 A/B desde una presión de 7722,1 kPa (1120 psig) hasta 2040,92 kPa (296 psig) las temperaturas obtenidas (293,23 K y 287,36 K (68,40 °F y 57,83 °F) respectivamente) son superiores a la temperatura de solidificación del vapor de agua presente en el aire (273,15 K o 32°F) por lo que no se presenta la formación de hielo alrededor de las válvulas.

De igual forma se validó que las condiciones de esta corriente se encuentran dentro de valores aceptables en función a los parámetros establecidos por el fabricante.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

1. Mediante el análisis del proceso de tratamiento del gas combustible de PIGAP I, se determinó que la mezcla de las fuente de gas combustible (Deshidratación Santa Bárbara y PIGAP I) no cumplen con las especificaciones establecidas por el fabricante, debido a que la temperatura de diseño es mayor a la que actualmente llega al patín de gas combustible.

2. La construcción del modelo en HYSYS del proceso de acondicionamiento de gas combustible a las condiciones de diseño original de la planta permite la verificación y validación en las condiciones de operación de cada uno de los equipos involucrados y su valor de respuesta en función a los parámetros establecidos por el fabricante para la correcta operación de los turbocompresores de la planta.

3. El sistema de gas combustible a las condiciones actuales de operación presenta una disminución en la temperatura de entrada del gas al sistema, producto de la modificación de las fuentes de suministro de este. Lo que trae como consecuencia que las condiciones de salida del gas al sistema de gas combustible estén fuera de especificaciones, ocasionando paros en los turbocompresores.

4. La variable crítica del proceso es la temperatura del gas, siendo la fuente de alimentación que mayor impacto ocasiona, para que no se alcance la temperatura

óptima a la entrada del patín de gas combustible, la correspondiente a la Planta de Deshidratación Santa Bárbara.

5. El mal funcionamiento de las válvulas PCV-12033A/B se debe a la formación de hielo alrededor de estas, producto de las bajas temperaturas producto de la expansión en las mismas. Esto hace que los actuadores no operen de forma adecuada, promoviendo la formación de líquidos, ocasionando paros por alto nivel de líquidos en el depurador S-1201.

6. La puesta en funcionamiento del calentador H-1201 permitiría disminuir el efecto en la baja temperatura del gas de entrada al sistema, sin embargo no sería suficiente para alcanzar los valores establecidos por el fabricante para la óptima operación de los turbocompresores.

7. La instalación del calentador entre la salida del calentador E-1205 y las válvulas PCV-12033A/B, permite alcanzar un valor óptimo de temperatura del gas combustible de acuerdo a las especificaciones del fabricante.

5.2. Recomendaciones

1. Evaluar desde el punto de vista operacional la factibilidad de incrementar la temperatura a la salida de la Planta de Deshidratación Santa Bárbara, por cuanto esta fuente es la que mas afecta a la temperatura del gas, para que la misma llegue al cabezal de succión de los turbocompresores con un valor tal que permita con los equipos actuales obtener los valores de presión y temperatura según especificaciones del fabricante.

2. Actualmente el calentador H-1201 se encuentra fuera de funcionamiento por lo que representa una desventaja para el sistema de acondicionamiento de gas ya que el aporte para el incremento de la temperatura en este no se logra. Por lo que se debe poner en funcionamiento el mismo.

3. Instalar un calentador entre el calentador E-1205 y las válvulas PCV-12033A/B, representa una alternativa viable a los efectos de lograr la temperatura según especificaciones para las fuentes y condiciones actuales de alimentación del gas combustible.

4. Monitorear las condiciones de proceso de los equipos que componen el sistema de gas combustible, en particular las válvulas PCV-12033A/B para evitar la formación del hielo alrededor, ya que este afecta el funcionamiento de las mismas y en consecuencia de todo el sistema.

BIBLIOGRAFÍA

1. Jiménez, L (2002). Documento Técnico PDVSA (GII-B-01-0103-1). Mejoras y Confiabilidad Operacional de las Turbomáquinas del Complejo Muscar. Departamento de Ingeniería de Instalaciones, Anzoátegui, Venezuela.
2. Suárez, R y Peñalver, J (2004). Documento Técnico PDVSA (S/N). Identificación de mejoras del sistema de gas combustible/arranque del Complejo Operativo Muscar. Departamento de Optimización y Desarrollo de Infraestructura, Monagas, Venezuela.
3. Wikipedia. Disponible: http://es.wikipedia.org/wiki/Gas_natural [Consulta: 2009, Mayo 7].
4. UCV, Ingeniería de Yacimientos. Disponible: <http://ingenieria-de-yacimientos.blogspot.com/2008/11propiedades-del-gas-natural.html>
5. Campbell, John M (2000). Gas Conditioning and Processing. Norman, Oklahoma, USA. Campbell Petroleum Series, 8va. Edición.
6. Gas Processors Suppliers Association (1998). Engineering Data Book. Pennsylvania, U.S.A. GPSA, 11va. Edición.
7. González, Eduardo (2002). Hidratos de Gas, Revista Marina [Revista en línea]. Disponible: <http://www.revistamarina.cl/revista/2002/2/gonzalez.pdf> [Consulta: 2009, Mayo 7].

8. Lecuona, A y Nogueira, J. (2000). Turbomáquinas. Barcelona, España, 1ra. Edición.
9. Nuovo Pignone (1997). Manual de uso para turbinas de gas. Volúmenes I y II. [Documento Digital]. Florencia, Italia.
10. Aspen HYSYS. Disponible: [http://www.aspentech.com/brochures/1270 Aspen HYSYS Product Brochure Final-pdf](http://www.aspentech.com/brochures/1270_Aspen_HYSYS_Product_Brochure_Final-pdf) [Consulta: 2009, Mayo 7].
11. Balestrini, Miriam (2001). Como se elabora un Proyecto de Investigación. BL Consultores y Asociados, Servicios Editorial, Caracas, Venezuela.
12. Tamayo y Tamayo, M (2001). El Proceso de Investigación Científica. Editorial Limusa, México. 4ta. Edición.
13. Hernández, Sampieri (2003). Metodología de la Investigación. Editorial Mc Graw Hill. Caracas, Venezuela. 2da. Edición.
14. Latorre, A., Rincón, D. del y Arnal, J. (2003). Bases Metodológicas de la Investigación Educativa. Editorial Experiencia S.L. Barcelona, España.
15. Arias, Fideas (2004). El Proyecto de Investigación. Guía para su elaboración. Editorial Episteme. 4ta. Edición.
16. PDVSA, Gerencia de Seguridad de los Procesos (1999). Memoria Descriptiva del Proceso de Compresión de Alta Presión. Punta de Mata, Venezuela. Revisión 0.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

TÍTULO	“Evaluación del proceso de acondicionamiento del gas combustible de la planta de inyección de gas a alta presión PIGAP I”
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CVLAC / E MAIL
Cedeño S., Fernando J.	CVLAC: 11.977.053 EMAIL: cedenofc@gmail.com

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Gas natural

Inyección

Simulación

Presión

Hidrato

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÁREA	SUB ÁREA
Ingeniería y Ciencias Aplicadas	Ingeniería de gas

RESUMEN (ABSTRACT):

La presente investigación tuvo como propósito evaluar el proceso de acondicionamiento del gas combustible de la Planta PIGAP I. En cuanto a la metodología de la investigación fue de tipo documental y de campo, con un nivel descriptivo. Los objetivos específicos consistieron en analizar el proceso de tratamiento actual del gas combustible de la Planta de Inyección de Gas de Alta Presión PIGAP I, la construcción del proceso en el simulador HYSYS bajo las condiciones de diseño original de la planta (caso diseño), analizar el sistema de gas combustible bajo las condiciones actuales de operación en el simulador HYSYS (caso operación actual), establecer las variables críticas del proceso e identificar mejoras en el sistema de gas combustible para cumplir con las especificaciones del fabricante. De acuerdo al desarrollo de la investigación se evaluaron diferentes escenarios en función a las fuentes de alimentación del gas combustible (Deshidratación Santa Bárbara y Deshidratación de Alta Presión), planteando posibles escenarios de operación del sistema con los cuales se trató de establecer las posibles causas que afectan el desempeño de los patines de acondicionamiento del gas combustible, ya que los mismos no son capaces de entregar el gas de acuerdo con las especificaciones del fabricante. Determinándose que se deben evaluar tanto la temperatura producto de la expansión de las válvulas PCV-12033A/B como la incorporación de un calentador adicional para lograr las condiciones óptimas de operación de los turbocompresores.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E-MAIL				
	ROL	CA	AS (X)	TU	JU
Ayala H, Orlando M.	CVLAC:	V-11.420.758			
	e-mail:	omayala@gmail.com			
	ROL	CA	AS (X)	TU	JU
Aguilera, Marilyn	CVLAC:				
	e-mail:				
	ROL	CA	AS (X)	TU	JU
Ayala R., Orlando F.	CVLAC:	CA	AS	TU	JU(X)
	e-mail:	V- 1.193.694			
	e-mail:	ayalah@cantv.net			
Moreno, Jesús	CVLAC:	CA	AS	TU	JU(X)
	e-mail:	C- 3.424.523			
	e-mail:	jamorenot@cantv.net			

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2009	10	29
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
Tesis.Evaluación_acodicionamiento_gascombustible.doc	Aplicación/msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I J K L M N O P Q
R S T U V W X Y Z . a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z . 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 .

ALCANCE

ESPACIAL: PDVSA (OPCIONAL)

TEMPORAL: _____ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero en gas

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Postgrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Programa de especialización de ingeniería en gas

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente Núcleo de Anzoátegui

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

De acuerdo al artículo 44 del Reglamento de Trabajo de Grado:

“Los Trabajos de Grado son exclusiva propiedad de la Universidad y solo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”

Cedeño S., Fernando J.

AUTOR

Orlando Ayala H.

TUTOR

Orlando Ayala R.

JURADO

Jesús Moreno

JURADO

Marilyn Aguilera

TUTOR