

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



**“EVALUACIÓN DEL EFECTO DE AZUFRE ELEMENTAL  
PRESENTE EN EL PILOTO REGULADOR FISHER 310-32 EN EL  
SISTEMA DE TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DE GAS A  
VENTA EN EL TRAMO ANACO – JOSE/PUERTO LA CRUZ”**

**REALIZADO POR:**

<b>González Siulgreth</b>	<b>C.I.: 17.236.939</b>
<b>Solórzano Arianny</b>	<b>C.I.: 16.398.907</b>

**Trabajo de Grado presentado ante la Universidad de Oriente como  
requisito parcial para optar al Título de:**

**INGENIERO QUIMICO**

**Barcelona, enero de 2010.**

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



**“EVALUACIÓN DEL EFECTO DE AZUFRE ELEMENTAL  
PRESENTE EN EL PILOTO REGULADOR FISHER 310-32 EN  
EL SISTEMA DE TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DE GAS A  
VENTA EN EL TRAMO ANACO – JOSE/PUERTO LA CRUZ”**

**ASESOR ACADEMICO:**

---

**Ing. Químico Ivelia Avendaño**

**Barcelona, enero de 2010.**

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



**“EVALUACIÓN DEL EFECTO DE AZUFRE ELEMENTAL  
PRESENTE EN EL PILOTO REGULADOR FISHER 310-32 EN  
EL SISTEMA DE TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DE GAS A  
VENTA EN EL TRAMO ANACO – JOSE/PUERTO LA CRUZ”**

**JURADOS:**

---

**Ing. Isvelia Avendaño**  
**Asesor Académico**

---

**Ing. Jairo Uricare**  
**Jurado Principal**

---

**Ing. Frank Parra**  
**Jurado Principal**

**Barcelona, enero de 2010.**

The seal of the Universidad de Cádiz is a circular emblem. It features a central five-pointed star with a vertical line passing through its center. The star is set against a light blue background. The entire emblem is enclosed within a red border with a yellow inner ring. The text 'UNIVERSIDAD DE CÁDIZ' is written in gold capital letters along the top inner edge of the red border, and '1792' is written at the bottom.

## RESOLUCIÓN

### REGLAMENTO DE TRABAJOS DE GRADO

De acuerdo al **ARTÍCULO 44** del reglamento de Trabajos de Grado, los trabajos de grado son exclusiva propiedad de la Universidad y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario

## DEDICATORIAS

**A Mis Padres**, más que a nadie les quiero dedicar mi éxito. A ti Papi porque te lo mereces, por salir a trabajar todos los días pensando que nos tienes a nosotros, que contamos contigo, que te necesitamos; Dios quiera y algún día pueda retribuirte todo lo que has hecho por nosotros, todo lo que has hecho por mí Mi Papi Bello. A ti mi Mami Preciosa, por estar allí con nosotros por siempre, por ser la persona en quien nos apoyamos... Los Amo Mucho espero se sientan orgullosos de su hija, por esto y más les dedico mi logro... Lo Logramos!!!

**A Mis Hermanitos Bellos**, para que al igual que yo logren todas las metas que se tracen en la vida, que nuestros padres se sientan orgullosos de nosotros y que nunca nadie nos diga que no podemos hacerlo... Para ustedes mis hermanos con mucho cariño...

**A mi Tía Bella**, te lo dedico con todo mi amor... no sabes lo que daría porque estuvieras aquí a mi lado compartiendo este éxito, pero yo se que donde quiera que estés debes estar feliz, porque tu sobrina bella por fin se va a graduar... compartiré este logro con mi Manito precioso, quien es una parte de ti y significa mucho para mí... Los Quiero Mucho.

**A ti mi Ángel Gabriel**, te dedico este éxito... tu más que nadie sabes lo que es alcanzar tu meta, pero Dios te necesitaba más a su lado... solo Dios sabe porque hace las cosas... Besos mi Ángel.

**A esos Amigos incondicionales**. Por tener a esos amigos que siempre están a nuestro lado, pase lo que pase, los que están siempre en los momentos buenos pero

principalmente en los malos.... a los que son verdaderamente mis mejores amigos, les dedico mi éxito... Los Quiero.

Especialmente te lo dedico **a ti Carla María**, Nunca te arrepientas de las cosas que has hecho, porque hasta las experiencias más amargas te dejan una lección muy valiosa que podrás utilizar alguna vez en tu vida.... **Disfruta tu logro, te lo mereces SONRIE!!!**

## **DEDICATORIAS**

**Con mucho amor... GRACIAS... MUCHAS GRACIAS!!!**

*Marcos Guerrero*

## **AGRADECIMIENTOS**

Le doy gracias primeramente a mi DIOS Todopoderoso, por ser mi creador y haberme permitido llegar hasta este día... **Gracias...**

Agradezco a mi Papi por haberme apoyado en todo momento, por estar a mi lado aun cuando no lo merecí, por brindarme la oportunidad de lograr mi sueño de ser Ingeniero, espero que se sienta orgulloso de mi tanto como yo me siento orgullosa de él, Te Quiero Mucho Papi, aunque no siempre te lo diga Te Quiero... **Gracias Mi Papi Bello...**

Le agradezco a mi Mami por estar siempre allí conmigo, por decirme la verdad cuando necesito escucharla, por quererme, apoyarme y ayudarme a seguir adelante a pesar de todo y de todos, por ser la persona con quien más puedo contar. Mami Te Quiero Mucho y tú lo sabes, quiero que te sientas orgullosa de tu hija mi amor bello... **Gracias Mami, gracias por ser mi Madre...**

Gracias a ti Mi Tía Bella, por haberme dicho un día que yo era especial y que podía lograr cualquier cosa que quisiera en la vida, que me devolviera y recuperara el camino que había perdido sin importar que tuviera que empezar de nuevo. Te Quise, Te Quiero y por siempre Te Querré... **Gracias mi Tía Bella...**

Gracias a ti Gabriel España, por decirme un día que no renunciara, que yo podía empezar desde cero y lograr lo que quería... gracias por pasar momentos bonitos conmigo, me hubiese gustado pasar más tiempo a tu lado pero Dios no lo quiso así. Los Ángeles existen, pero como no les vemos alas, solemos llamarlos amigos, así como TU!!! **Gracias Mi Ángel Gabriel...**

Quiero agradecer a todas esas personas que de una u otra manera me apoyaron y me acompañaron en este largo recorrido, a una persona en especial que sin querer ni saber significo mucho para mí; que me hizo ver, a su modo, que yo si podía y que debía darlo todo por alcanzar mi meta... **Gracias...**

Le doy las Gracias a mis compañeros de grupo porque sin ellos no hubiese sido posible lograr este éxito. Gracias a ti mi Compi Siul, porque más que mi compañera te considero una amiga con quien he compartido buenos momentos y espero sean más... **Gracias...**

Gracias a usted Profesora Ivelia por creer en mí desde el principio y hacerme pensar y sentir que ya soy un Ingeniero, se siente muy bien que confien en ti y en todo lo que puedes hacer y sobretodo viniendo de una persona tan preparada como usted. Gracias por asesorarnos y compartir con nosotros este logro... **Muchas Gracias...**

Gracias a mis amigos especiales, gracias por compartir conmigo tantos momentos buenos y también malos, gracias por estar allí. En especial a ti José Gregorio, que antes que todo siempre has sido mi mejor amigo, quien me ayudo y me brindo su apoyo incondicional en todo momento... **Gracias mi Corazón...**

Y a todas esas personas, que son especiales para mí y que si me pongo a nómbralas a todas no me alcanzarían las hojas para decirles todo lo que las quiero y lo especiales que son, Gracias... **Gracias por existir...**

**Con mucho amor... GRACIAS... MUCHAS GRACIAS!!!**

*Carla María Curapiaca Hernández*

## **AGRADECIMIENTOS**

**Con mucho amor... GRACIAS... MUCHAS GRACIAS!!!**

*Marcos Guerrero.*

# **INTRODUCCION**

## **OBJETIVOS**

**Objetivo General**

**Objetivos Específicos**

## RESÚMEN

En Venezuela, dado que es un país eminentemente petrolero, el gas natural ha sido utilizado desde comienzos del siglo XX, a diferencia de décadas anteriores cuando grandes volúmenes de gas eran quemados y lanzados a la atmósfera. Su principal uso ha sido como combustible, actualmente existen redes de tuberías que cubren toda la zona norte del país y ciudades, como Maracaibo añadiéndose a esto el auge que ha tenido la construcción de redes interna de gas para suministro de plantas de procesos. En este proyecto se presenta una evaluación del efecto de azufre elemental presente en el piloto regulador Fisher 310-32 en el sistema de transporte y distribución de gas a venta en el tramo Anaco – Jose/Puerto la cruz, propuesta realizada por la empresa PDVSA Gas Anaco, en una monografía realizada por Curapiaca Carla, González Siulgreth, Guerrero Marcos y Solórzano Arianny; que comprende la ubicación del área de estudio, principales equipos presentes en las diferentes estaciones reguladoras, principio de funcionamiento del regulador y filtro Fisher, equipos dispositivos y accesorios necesarios para la implementación o mantenimiento de las estaciones de regulación. Mientras esté presente el azufre elemental en el gas que se transporta y distribuye se requiere removerlo de todos los equipos que son susceptibles a fallar por acumulación del sólido en sus partes internas. Solamente existen dos posibilidades de minimizar los problemas que ocasiona: Evitarlo y Removerlo. A fin de resolver la problemática se plantean los procesos de desulfuración los cuales permiten reducir la concentración de sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) en el mismo, ya que es altamente corrosivo para las cañerías de acero al carbono y tóxico en caso de venteo.

## ÍNDICE GENERAL

<b>RESOLUCIÓN .....</b>	<b>IV</b>
<b>DEDICATORIAS .....</b>	<b>VIII</b>
<b>DEDICATORIAS .....</b>	<b>X</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>V</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>VII</b>
<b>INTRODUCCION .....</b>	<b>V</b>
<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>V</b>
OBJETIVO GENERAL .....	V
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	V
<b>RESÚMEN .....</b>	<b>VI</b>
<b>ÍNDICE GENERAL .....</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>XIV</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>XVI</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>17</b>
<b>EL PROBLEMA .....</b>	<b>17</b>
1.1    PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	17
1.2    OBJETIVOS .....	17
1.2.1    Objetivo General .....	17
1.2.2    Objetivos Específicos.....	18
1.3    ALCANCES Y LIMITACIONES .....	18
1.4    JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	18
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>20</b>

<b>MARCO TEORICO.....</b>	<b>20</b>
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN .....	20
2.2 UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LAS INSTALACIONES .....	20
2.3 BASES TEÓRICAS .....	22
2.3.1 Gas natural .....	22
2.3.2 Clasificación de los yacimientos de gas.....	23
2.3.2.1 Yacimientos de gas seco: .....	23
2.3.2.2 Yacimientos de gas húmedo: .....	24
2.3.2.3 Yacimientos de gas condensado: .....	25
2.3.3 Clasificación del gas natural en función de la composición .....	26
2.3.3.1 Gas Ácido. ....	26
2.3.3.2 Gas dulce. ....	27
2.3.4 Líquidos del gas natural. ....	27
2.3.5 Gas licuado de petróleo (GLP).....	27
2.3.6 Gasolina natural .....	27
2.3.7 Gas natural licuado.....	27
2.3.8 Transporte de gas natural .....	28
2.3.9 Distribución de gas natural.....	28
2.4 USO INDUSTRIAL DEL GAS NATURAL .....	29
2.4.1 Industria del vidrio .....	30
2.4.2 Industria de alimentos .....	30
2.4.3 Industria textil .....	30
2.4.4 Fundición de metales .....	30
2.4.5 Generación de electricidad.....	30
2.4.6 Petroquímica .....	31
2.5 INSTALACIONES DE GAS NATURAL EN LA INDUSTRIA.....	31
2.5.1 Estación de regulación y medición .....	31
2.5.2 Tuberías.....	32

2.5.2.1	Tuberías de polietileno .....	32
2.5.2.2	Tuberías de acero .....	33
2.5.2.3	Tuberías de cobre.....	33
2.5.3	Válvulas .....	34
2.5.3.1	Válvulas de seguridad.....	34
2.5.3.2	Válvulas de bloqueo .....	34
2.5.4	Filtros .....	34
2.5.5	Medidores.....	34
2.5.1	Medidores de Membrana.....	34
2.5.2	Medidores Rotativos .....	34
2.5.3	Medidores de turbina.....	35
2.5.6	Quemadores .....	35
2.5.7	Regulador de presión .....	35
2.5.7.1	Funcionamiento de los reguladores de presión.....	36
2.5.7.2	Elementos que componen un regulador .....	39
2.5.7.3	Tipos de Reguladores-Características.....	40
2.5.7.3.1	Reguladores Auto-Operados: .....	40
2.5.7.3.2	Reguladores Pilotados: .....	42
2.6	CADENA DE VALORES DEL GAS NATURAL.....	44
2.6.1	Exploración .....	45
2.6.2	Extracción .....	45
2.6.3	Transporte y almacenamiento. ....	46
2.7	PROCESAMIENTO DEL GAS NATURAL.....	47
2.8	TRATAMIENTO DEL GAS NATURAL .....	49
2.8.1	Factores que afectan el diseño de un sistema para tratamiento del gas.	54
2.8.2	Efectos del contaminante .....	54
2.8.2.1	Sobre las personas:.....	55
2.8.2.2	Sobre el Medio Ambiente: .....	56

2.8.2.3 Sobre los equipos:.....	57
2.9 PROCESOS INDUSTRIALES DE ENDULZAMIENTO DEL GAS NATURAL ....	58
2.10 OPCIONES DE TRATAMIENTO DEL GAS NATURAL .....	61
2.10.1 Procesos regenerativos .....	62
2.10.1.1 Proceso con Aminas .....	62
2.10.1.2 Proceso REDOX.....	63
2.10.2 Procesos no regenerativos.....	64
2.10.2.1 Reactivo líquido basado en Nitrito de Sodio.....	65
2.10.2.2 Reactivo sólido basado en óxido de hierro.....	66
2.10.2.3 Esponja de hierro .....	68
2.11 UTILIZACIÓN DE UN REACTIVO SÓLIDO PARA LA ELIMINACIÓN DE H <sub>2</sub> S	
DE GASES .....	69
2.11.1 Selección de la tecnología.....	70
2.11.1.1 Tecnología Regenerativa vs. No regenerativa.....	70
2.11.1.2 Tecnología de Reactivos Sólidos vs. Otros proceso No	
Regenerativa.....	70
2.11.2 Operación:.....	71
2.11.2.1 Descripción de las instalaciones .....	71
2.11.2.2Carga del reactivo .....	71
2.11.2.3Puesta en Marcha.....	73
2.11.2.4Operación.....	74
2.11.2.5 Parada del Sistema.....	76
2.11.2.6Descarga del producto usado .....	76
2.11.2.7Disposición final del producto usado .....	77
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>78</b>
<b>MARCO METODOLÓGICO .....</b>	<b>78</b>
3.1 TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN .....	78
3.1.1 La observación Directa: .....	78

3.2	INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	79
3.3	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE DATOS .....	79
3.4	FASES DE LA INVESTIGACIÓN .....	79
3.4.1	Revisión Bibliográfica: .....	79
3.4.2	Actualización de datos: .....	79
3.4.3	Emisión de las Conclusiones y Recomendaciones: .....	80
3.4.4	Elaboración del Informe final: .....	80
	<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>81</b>
	<b>DESARROLLO DEL TRABAJO .....</b>	<b>81</b>
3.1	IDENTIFICACIÓN DE LA FUENTE DE AZUFRE ELEMENTAL EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN EN EL TRAMO ANACO – JOSE/PUERTO LA CRUZ... 81	
3.1.1	Determinación de la granulometría y naturaleza de los sólidos..... 86	
3.1.2	Análisis de sólidos anteriormente realizados en los sistemas de transporte y distribución..... 87	
3.1.2.1	Distribución de sólidos. .... 88	
3.1.2.2	Velocidad de flujo. .... 88	
3.1.2.3	Configuración. .... 89	
3.2	ESTUDIO DE EL PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LOS PILOTOS DE REGULADORES FISHER 310-32 INSTALADOS EN EL SISTEMA ANACO JOSE/PTO. LA CRUZ. .... 89	
3.3	ANÁLISIS DEL EFECTO PROVOCADO POR LA ACUMULACIÓN DE AZUFRE ELEMENTAL EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DE GAS EN EL TRAMO ANACO – JOSE/PUERTO LA CRUZ. .... 92	
3.3.1	En los gasoductos:..... 92	
3.3.2	En las estaciones de recepción, regulación, medición y limpieza: . 92	
3.3.3	En los equipos de combustión..... 93	

3.4	CONSIDERACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS DE LA ACUMULACIÓN DE AZUFRE ELEMENTAL EN EL SUMINISTRO DE GAS A LOS CLIENTES DE PUERTO LA CRUZ	94
3.5	DEFINICIÓN DE LAS MEDIDAS QUE SE ADOPTARÁN PARA LA PREVENCIÓN DE DEFICIENCIAS EN EL SUMINISTRO DE GAS A LOS CLIENTES DE DISTRIBUCIÓN PUERTO LA CRUZ.	95
3.5.1	Eliminación del contaminante	96
3.5.2	Selección del filtro.	101
3.5.2.1	Ubicación del filtro	101
3.5.2.2	Mantenimiento del filtro.	102
	<b>CAPÍTULO V</b>	<b>103</b>
	<b>DISCUSIONES, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>103</b>
4.1	IDENTIFICACIÓN DE LA FUENTE DE AZUFRE ELEMENTAL EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN EN EL TRAMO ANACO – JOSE/PUERTO LA CRUZ.	103
4.1.1	Naturaleza del contaminante	103
4.2	ESTUDIO DE EL PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LOS PILOTOS DE REGULADORES FISHER 310-32 INSTALADOS EN EL SISTEMA ANACO JOSE/ PTO. LA CRUZ.	105
4.3	ANÁLISIS DEL EFECTO PROVOCADO POR LA ACUMULACIÓN DE AZUFRE ELEMENTAL EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DE GAS EN EL TRAMO ANACO – JOSE/PUERTO LA CRUZ.	106
4.4	CONSIDERAR LAS CONSECUENCIAS DE LA ACUMULACIÓN DE AZUFRE ELEMENTAL EN EL SUMINISTRO DE GAS A LOS CLIENTES DE PUERTO LA CRUZ.	107
4.5	DEFINICIÓN DE LAS MEDIDAS QUE SE ADOPTARÁN PARA LA PREVENCIÓN DE DEFICIENCIAS EN EL SUMINISTRO DE GAS A LOS CLIENTES DE DISTRIBUCIÓN PUERTO LA CRUZ.	108
	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>113</b>

<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>115</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>124</b>
<b>METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO</b>	<b>125</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>FIGURA 2.1.- SISTEMA ANACO – JOSE – PUERTO LA CRUZ</i> .....	21
<i>FIGURA 2.2.- PRINCIPALES COMPONENTES DE UNA MUESTRA DE GAS NATURAL</i> .	22
<i>FIGURA 2.3.- YACIMIENTO DE GAS SECO</i> .....	24
<i>FIGURA 2.4.- YACIMIENTO DE GAS HÚMEDO</i> .....	25
<i>FIGURA 2.5.- TRANSPORTE DE GAS NATURAL LICUADO</i> .....	28
<i>FIGURA 2.6.- GASODUCTOS</i> .....	28
<i>FIGURA 2.7.- ESQUEMA DE DISTRIBUCIÓN DEL GAS NATURAL</i> .....	29
<i>FIGURA 2.8.- PRODUCTOS QUÍMICOS A PARTIR DEL GAS NATURAL</i> .....	31
<i>FIGURA 2.9. ESTACIÓN DE REGULACIÓN Y MEDICIÓN</i> .....	32
<i>FIGURA 2.10.- REGULADOR DE PRESION</i> .....	35
<i>FIGURA 2.11.- REGULADOR DE PRESIÓN AUTO-OPERADO</i> .....	37
<i>FIGURA 2.12. CURVA TÍPICA DE DESEMPEÑO DE UN REGULADOR</i> .....	41
<i>FIGURA 2.13. ESQUEMÁTICO DE UN REGULADOR PILOTADO</i> .....	42
<i>FIGURA 2.14.- CADENA DE VALORES DEL GAS NATURAL</i> .....	44
<i>FIGURA 2.15.- PROCESAMIENTO DEL GAS NATURAL</i> .....	49
<i>FIGURA 2.16.- DIAGRAMA GENERAL DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DEL GAS NATURAL</i> .....	52
<i>FIGURA 2.17.- ESQUEMA GENERAL DEL PROCESO DE ABSORCIÓN QUÍMICA PARA LA CAPTURA DE CO2 EN GASES DE COMBUSTIÓN (CTCP)</i> .....	62
<i>FIGURA 3.1.- SISTEMA DE TRANSPORTE ANACO – JOSE – PUERTO LA CRUZ</i> .....	81

<i>FIGURA 3.2.</i> - ELEMENTO FILTRANTE 254 - RP MAPRICA.....	82
<i>FIGURA 3.3.</i> - TAPÓN DE SÓLIDO – RP TASA.....	83
<i>FIGURA 3.4.</i> - PIEZA DEL REGULADOR CONTAMINADA CON SÓLIDO AMARILLO - RP CAICO .....	84
<i>FIGURA 3.5.</i> - ASIENTO DE REGULADOR 310-32 EMR TIGASCO BARCELONA .....	85
<i>FIGURA 3.5.</i> - ESPECTRO EDX AZUFRE .....	86
<i>FIGURA 3.6.</i> - MICROFOTOGRAFIA SÓLIDOS MAPRINCA.....	86
<i>FIGURA 3.7.</i> REGULADOR PILOTADO TIPO 310-32 MARCA FISHER.....	90
<i>FIGURA 3.8.</i> - REGULADOR PILOTADO TIPO 310-32 MARCA FISHER. ....	91
<i>FIGURA 3.9.</i> - PRESENCIA DE AZUFRE ELEMENTAL EN EL INTERIOR DE VÁLVULA REGULADORA.....	95
<i>FIGURA 3.10.</i> PROCESOS DE DESULFURACIÓN DE GAS .....	96
<i>FIGURA 3.11.</i> - ESQUEMA TÍPICO DE UN REACTOR DE SULFATREAT.....	99
<i>FIGURA 3.12.</i> - CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE SULFATREAT .....	100
<i>FIGURA 4.1.</i> - NEGOCIO DEL GAS NATURAL .....	109
<i>FIGURA 4.2.</i> - COMPARACIÓN DE TODOS LOS PROCESOS DE DESULFURACIÓN. ....	112

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>TABLA 2.1.</i> - VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS TUBERÍAS. ....	33
<i>TABLA 2.2.</i> - CARACTERÍSTICAS REQUERIDAS EN EL GAS. ....	51
<i>TABLA 2.3.</i> - PROPIEDADES FÍSICO QUÍMICAS DE H <sub>2</sub> S.....	55
<i>TABLA 2.4.</i> - EFECTOS DEL H <sub>2</sub> S SOBRE LA SALUD.....	56
<i>TABLA 3.1.</i> - MUESTRAS DISTRIBUCIÓN CENTRO Y CENTRO OCC.....	87
<i>TABLA 3.2.</i> - MUESTRAS TRANSPORTE ANACO – PTO. ORDAZ.....	87
<i>TABLA 3.3.</i> - VELOCIDADES EN LAS REGULACIONES (PIES/SEG) .....	88
<i>TABLA 3.4.</i> - LIMITE DE COMPONENTES MAYORITARIOS Y MINORITARIOS. COMPONENTES EN TRAZAS .....	94
<i>TABLA 3.5.</i> - PUNTO OPTIMO DE USO DE SULFATREAT .....	97

# **CAPÍTULO I**

## **EL PROBLEMA**

### **1.1 Planteamiento del Problema**

La empresa PDVSA Gas Anaco ha mostrado en la última década un crecimiento progresivo tanto de sus instalaciones industriales como de su cartera de clientes y con este crecimiento ha surgido la necesidad de garantizar el suministro de gas a los mismos. Mientras estén presentes sólidos en el gas que se transporta y distribuye se requiere removerlo de todos los equipos que son susceptibles a fallar por acumulación de estos en sus partes internas. Varios aspectos a considerar durante la evaluación del efecto de azufre elemental presente en el sistema de transporte, son las condiciones operacionales que propician la distribución y acumulación de sólidos en la línea, esto con el fin de orientar acciones específicas que eviten el mal funcionamiento de los equipos que manejan corrientes de gas con mayor cantidad de sólidos. La eliminación del azufre elemental dependerá de su origen y de la factibilidad de aplicación de las acciones definitivas que eliminen o mitiguen la causa raíz. En vista de la problemática presentada, se realizará una evaluación del origen de azufre elemental en el sistema de transporte y distribución de gas a venta en el tramo Anaco – Jose/ Puerto la Cruz, tomando en cuenta que el elemento no está asociado al gas desde el yacimiento, sino que proviene de reacciones químicas secundarias del secuestrante de H<sub>2</sub>S utilizado, y así lograr determinar las acciones a seguir para prevenir la perturbación del sistema.

### **1.2 Objetivos**

#### **1.2.1 Objetivo General**

Evaluar el efecto de azufre elemental presente en el piloto del regulador Fisher 310-32 en el sistema de transporte y distribución de gas a venta en el tramo Anaco – Jose /Puerto la Cruz

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

1. Identificar la fuente de azufre elemental en el sistema de transporte y distribución en el tramo Anaco – Jose/Puerto la Cruz.
2. Estudiar el principio de operación de los pilotos de reguladores Fisher 310-32 instalados en el sistema Anaco Jose/ Pto. La Cruz.
3. Analizar el efecto provocado por la acumulación de azufre elemental en el sistema de transporte y distribución de gas en el tramo Anaco – Jose/Puerto la Cruz.
4. Considerar las consecuencias de la acumulación de azufre elemental en el suministro de gas a los clientes de Puerto la Cruz.
5. Definir las medidas que se adoptarán para la prevención de deficiencias en el suministro de gas a los clientes de distribución Puerto la Cruz

### **1.3 Alcances y limitaciones**

El alcance del proyecto viene dado por el establecimiento de la fuente de azufre elemental, el efecto provocado por la acumulación de azufre sólido en el gasoducto y de las posibles consecuencias que acarrea esto para los clientes. La limitación está enfocada hacia la falta de información oficial del yacimiento que permita establecer la forma más apropiada para corregir el problema durante la etapa de pre-tratamiento.

### **1.4 Justificación e importancia**

Al validar la información suministrada del tramo Anaco-Jose/Puerto La Cruz se puede determinar el origen del azufre elemental en el gasoducto, se vuelve un aporte

significativo en el área de distribución de PDVSA Gas Anaco, ya que la importancia de realizar este proyecto radica en que se debe cumplir con las especificaciones dadas por el cliente y garantizar el buen funcionamiento de los equipos que intervienen en el proceso, sin que éstos corran el riesgo de presentar averías que afecten su funcionamiento.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEORICO**

#### **2.1 Antecedentes de la investigación**

El día 17-07-2000 se evidenció baja presión en la estación del cliente Maprinca, debido a falla en el Regulador de la ERP (Estación de Regulación Primaria), la acción tomada fue limpieza del Piloto y filtro. Nuevamente los días 02-08-2000 y 11 Febrero 2001 se repite el mismo tipo de falla, como acción tomada en ambos casos fue la limpieza del Piloto y Filtro.

La Superintendencia de Operaciones del Sistema Anaco Jose, con acción inmediata, sustituyó el filtro Fisher 254 instalado en la línea de gas de potencia del piloto, por un filtro marca Welker modelo F5 que retiene partículas de menor tamaño, con el fin de minimizar la afectación por sólidos mientras se determinaba la acción definitiva a acometer, solicitando a Ingeniería de Confiabilidad evaluar las características y fuente de los sólidos encontrados y la posibilidad de minimizarlos del proceso.

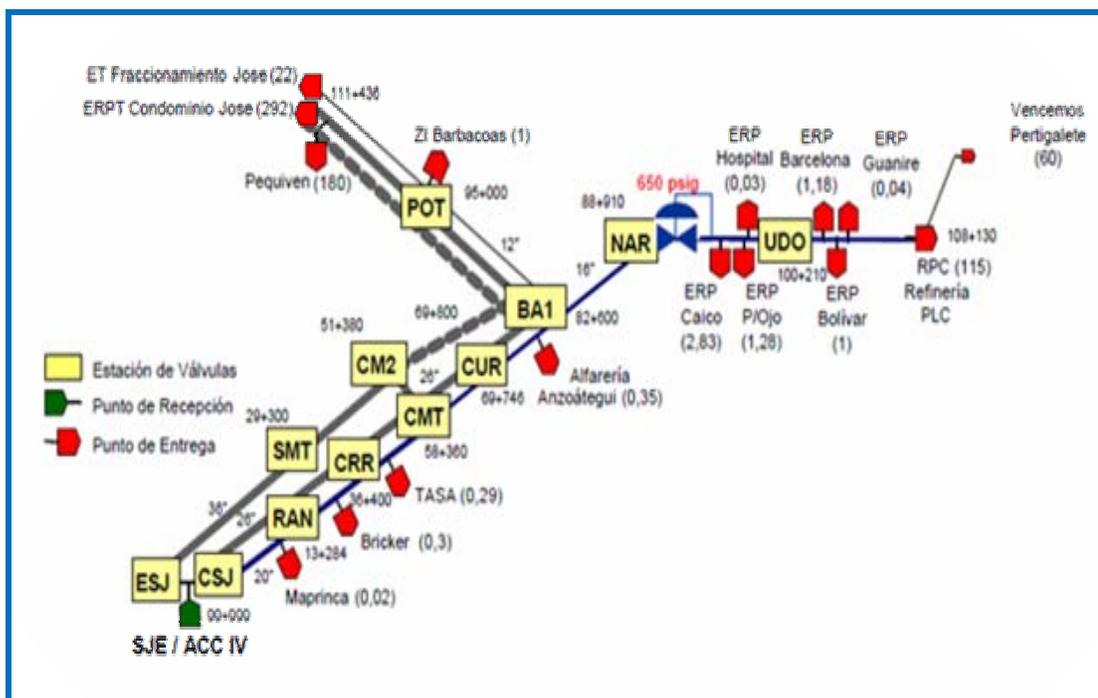
#### **2.2 Ubicación y características de las instalaciones**

El sistema Anaco-Jose-Puerto-La Cruz tiene su inicio en la estación San Joaquín (planta Criogénica que procesa gas del Norte de Monagas y Área Mayor de Oficina) Anaco y finaliza en la Refinería Puerto La Cruz, la finalidad del sistema es suministrar gas al área nororiental del país. Teniendo como única fuente, gas procesado desde la estación San Joaquín. Este sistema está conformado por dos tuberías principales y un ramal de suministro alternativo hacia la Planta Jose.

El gasoducto tiene su origen en la estación San Joaquín y finaliza en la estación Refinería, con diámetro de 20” hasta la estación Crucero de Maturín y 16” a partir de allí hasta Refinería.

El ASAP (Ampliación Sistema Anaco Pto. La Cruz) de diámetro 26” se origina en la Estación San Joaquín y finaliza en la estación Planta Jose. El ramal Jose se inicia a partir de un kilómetro aguas abajo de la estación Crucero de Barbacoa y concluye en la estación Planta Jose.

El sistema posee nueve (9) estaciones de válvulas intermedias. (*Ver Figura 2.1*) y maneja un volumen diario de aproximadamente 400 MMPCSD, manteniéndose en la estación San Joaquín una presión controlada entre 800 y 880 psi.



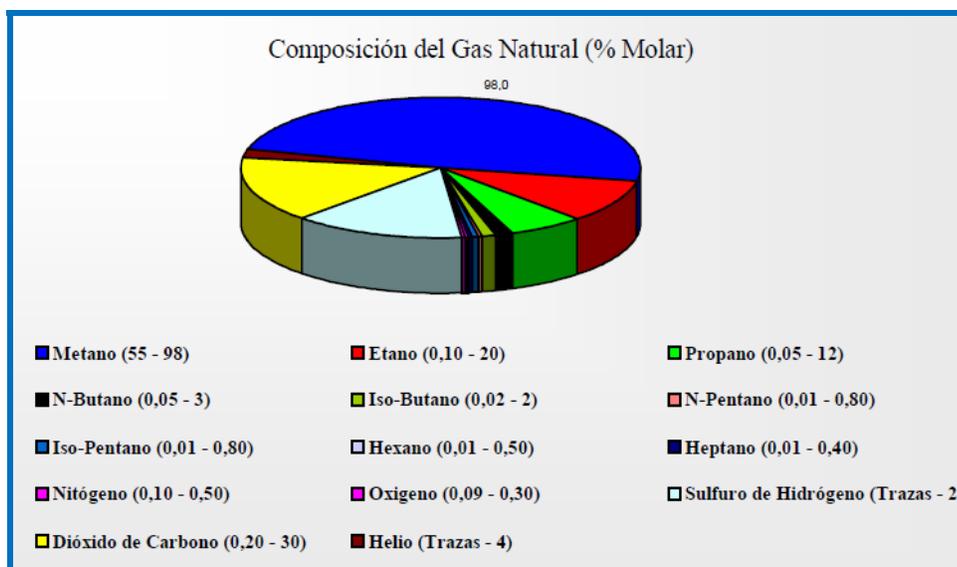
**Figura 2.1.- Sistema Anaco – Jose – Puerto la Cruz**

Los consumos más significativos los constituyen USI Pequiven, Petrozuata, Fertinitro, Planta de fraccionamiento Jose, Refinería Pto. La Cruz, Cadafé Guanta y cementos Pertigalete.

## 2.3 Bases teóricas

### 2.3.1 Gas natural

El gas natural es una mezcla homogénea, en proporciones variables de hidrocarburos parafínicos, los cuales responden a la fórmula ( $C_NH_{2N+2}$ ) con cantidades menores de gases inorgánicos, como el Nitrógeno ( $N_2$ ), el Dióxido de Carbono ( $CO_2$ ) y pequeñas porciones de compuestos de azufre. Estos últimos pueden ocasionar verdaderos problemas operacionales (corrosión en los equipos). El componente principal del gas natural es el metano, cuyo contenido varía generalmente entre 60 y 90 % en volumen. Contiene también, etano, propano, butano y componentes más pesados en proporciones menores y decrecientes. A continuación, se muestra en la **Figura 2.2**, los principales componentes del gas natural de nuestro país.



**Figura 2.2.- Principales Componentes de una Muestra de Gas natural**

En términos generales se puede señalar que el gas natural es una mezcla de hidrocarburos (principalmente metano) que existe en los yacimientos en fase gaseosa, o en solución con el petróleo, y que a condiciones atmosféricas permanece en fase gaseosa. Puede encontrarse mezclado con algunas impurezas o sustancias que no son hidrocarburos, tales como Ácido Sulhídrico o Sulfuro de Hidrógeno ( $H_2S$ ), además de Nitrógeno y Dióxido de Carbono.

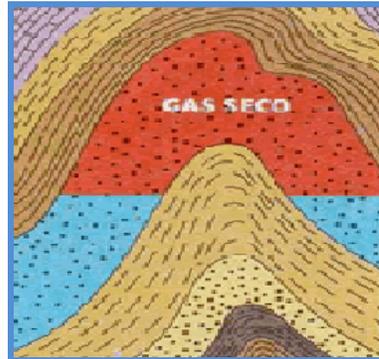
### **2.3.2 Clasificación de los yacimientos de gas**

Por su origen, el gas natural se clasifica en *asociado* y *no asociado*. El *gas asociado* es aquel que se encuentra en contacto y/o disuelto en el petróleo del yacimiento. El *gas no asociado*, por el contrario, es aquel que se encuentra en yacimientos que no contienen crudo, a las condiciones de presión y temperatura originales. En los yacimientos, generalmente, el gas natural asociado se encuentra como gas húmedo ácido, mientras que el no asociado puede hallarse como húmedo ácido, húmedo dulce o seco.

En base a estos criterios de condensación y de acuerdo a su presión y temperatura inicial, podemos clasificar los Yacimientos de Gas en: Yacimientos de gas seco, Yacimientos de gas húmedo y Yacimientos de gas condensado.

#### **2.3.2.1 Yacimientos de gas seco:**

En estos yacimientos el gas es el producto principal. Son yacimientos que contienen hidrocarburos en fase gaseosa, y al ser producidos siguen siendo gases, a pesar de los cambios de presión y temperatura (*Ver figura 2.3*). El gas se genera por la acción de un proceso de expansión, parecido al que ocurre en las bombonas, donde la cantidad de gas está relacionada con la presión del envase.



**Figura 2.3.- Yacimiento de Gas Seco**

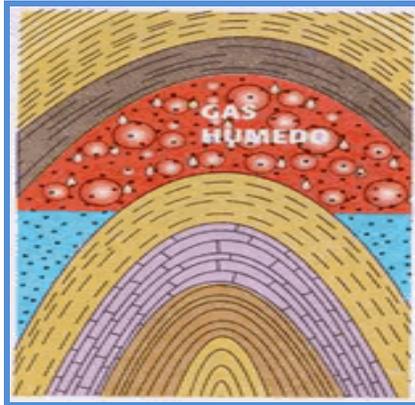
Dentro de sus principales características se tiene que:

- Su temperatura inicial excede la temperatura cricondentérmica.
- Están constituidos por metano, con rastros de hidrocarburos superiores.
- Están constituidos por hidrocarburos que, aún en superficie y a presión y temperatura de tanque, no condensan.
- Poseen alta energía cinética de sus moléculas y baja atracción de las mismas.

### **2.3.2.2 Yacimientos de gas húmedo:**

Este es un gas del cual se pueden obtener una riqueza líquida de hasta 3 GPM (galones por mil pies cúbicos normales de gas) No existe ninguna relación con el contenido de vapor de agua que pueda contener el gas. En los yacimientos de gas húmedo existe mayor porcentaje de componentes intermedios y pesados que en los yacimientos de gas seco (*ver figura 2.4*). La mezcla de hidrocarburos permanece en estado gaseoso en el yacimiento, pero al salir a la superficie cae en la región de dos fases formándose una cantidad de hidrocarburos líquido del orden de 10 a 20 BN / MM PCN. Este parámetro llamado riqueza líquida es de gran importancia, para la

comercialización del gas natural, ya que los líquidos producidos son de poder de comercialización.



**Figura 2.4.- Yacimiento de Gas Húmedo**

Dentro de sus principales características se tiene que:

- Su temperatura inicial excede la temperatura cricondentérmica.
- Están constituidos por hidrocarburos livianos a intermedios.
- Están constituidos por hidrocarburos que no condensan a condiciones de yacimiento pero si a condiciones de separador.

### **2.3.2.3 Yacimientos de gas condensado:**

Estos yacimientos producen condensación retrograda en el yacimiento a presiones por debajo de la presión de rocío y temperaturas entre la crítica y la cricondentérmica. El gas al disminuir la presión se condensa.

Estos tipos de yacimientos también pueden ubicarse de acuerdo con la localización de la temperatura y la presión inicial del mismo con respecto a la región de dos fases (gas y petróleo) en los diagramas de fases que relacionan estas dos variables.

Cuando la presión y la temperatura caen dentro de la región de dos fases, existirá una zona de petróleo con una capa de gas en la parte superior. La zona de petróleo producirá como un yacimiento de petróleo de punto de burbujeo y la capa de gas como un yacimiento monofásico de gas o como un yacimiento retrogrado de gas.

### **2.3.3 Clasificación del gas natural en función de la composición**

Siendo la composición del gas natural un parámetro de gran importancia, se utiliza para la clasificación del mismo y quedan:

#### **2.3.3.1 Gas Ácido.**

Este es un gas cuyo contenido de sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) es mayor que 0,25 granos por cada 100 pies cúbicos normales de gas por hora ( $>$  de 0,25 granos/100 PCNH). Esto equivale a cuatro partes por millón, en base a volumen (4 ppmV de  $H_2S$ ). En el Sistema Británico de Unidades esto significa, que hay 4 lbmol de  $H_2S$  /  $1 \times 10^6$  lbmol de mezcla. La GPSA, define a un gas ácido como aquel que posee más de 1,0 grano/100 PCN o 16 ppmV de  $H_2S$ .

Si el gas está destinado para ser utilizado como combustible para rehervidores, calentadores de fuego directo o para motores de compresores puede aceptarse hasta 10 granos de  $H_2S$  /100 PCN. La norma 2.184 válida para tuberías de gas, define a un gas ácido como aquel que contiene más de 1 grano de  $H_2S$  /100 PCN de gas, lo cual equivale a 16 ppmV de  $H_2S$ .

Existen también otros gases de naturaleza ácida, como son por ejemplo el Sulfuro de Carbonilo ( $CO_S$ ), este es un compuesto inestable, corrosivo y tóxico, que se descompone en ( $H_2S + CO_2$ ). Los Mercaptanos, los cuales se pueden representar a través de la siguiente fórmula ( $RSH$ ), son compuestos inestables y de alto grado de corrosión, en muchos casos reaccionan con algunos solventes, descomponiéndolos. Otro gas de carácter ácido son los disulfuros, como por ejemplo el Disulfuro de

Carbono. En términos generales, se considera que un gas es apto para ser transportado por tuberías, cuando contiene  $\leq 4$  ppmV de  $H_2S$ ;  $\leq$  de 3% de  $CO_2$  y  $\leq 6$  a 7 lb de agua por millones de pies cúbicos normales de gas (MM de PCN de gas).

### **2.3.3.2 Gas dulce.**

Este es un gas que contiene cantidades de  $H_2S$ , menores a cuatro (4) partes por millón en base a volumen (4 ppm, V) y menos de 3% en base molar de  $CO_2$ .

### **2.3.4 Líquidos del gas natural.**

Es una mezcla de propano, butanos, pentanos y otros hidrocarburos más pesados. Es un producto intermedio en el procesamiento del gas natural.

### **2.3.5 Gas licuado de petróleo (GLP)**

Es una mezcla de propano y butano. Se transporta en tanques y balones para utilizarse como combustible.

### **2.3.6 Gasolina natural**

Es una mezcla de pentano, hexano y otros hidrocarburos más pesados. Se usa en las refinerías para la preparación de gasolinas de uso automotor y como materia prima para la petroquímica.

### **2.3.7 Gas natural licuado**

Es el gas natural seco que ha sido licuefactado mediante un proceso de enfriamiento, en el cual se disminuye su temperatura hasta  $-160^\circ C$  con una reducción de su volumen en aproximadamente seiscientos (600) veces. De esta forma el gas natural puede ser exportado a través de “barcos metaneros” a los centros de consumo (*ver figura 2.5*).



**Figura 2.5.- Transporte de Gas Natural Licuado**

### **2.3.8 Transporte de gas natural**

El transporte de gas natural se realiza a través de gasoductos desde los lugares de producción o procesamiento hasta un punto que se le denomina “City Gate”, que viene a ser el lugar donde se realiza la reducción de presión, medición y odorización, antes de su distribución a los centros de consumo. El transporte por gasoductos se realiza a presiones mayores de 20 bar.

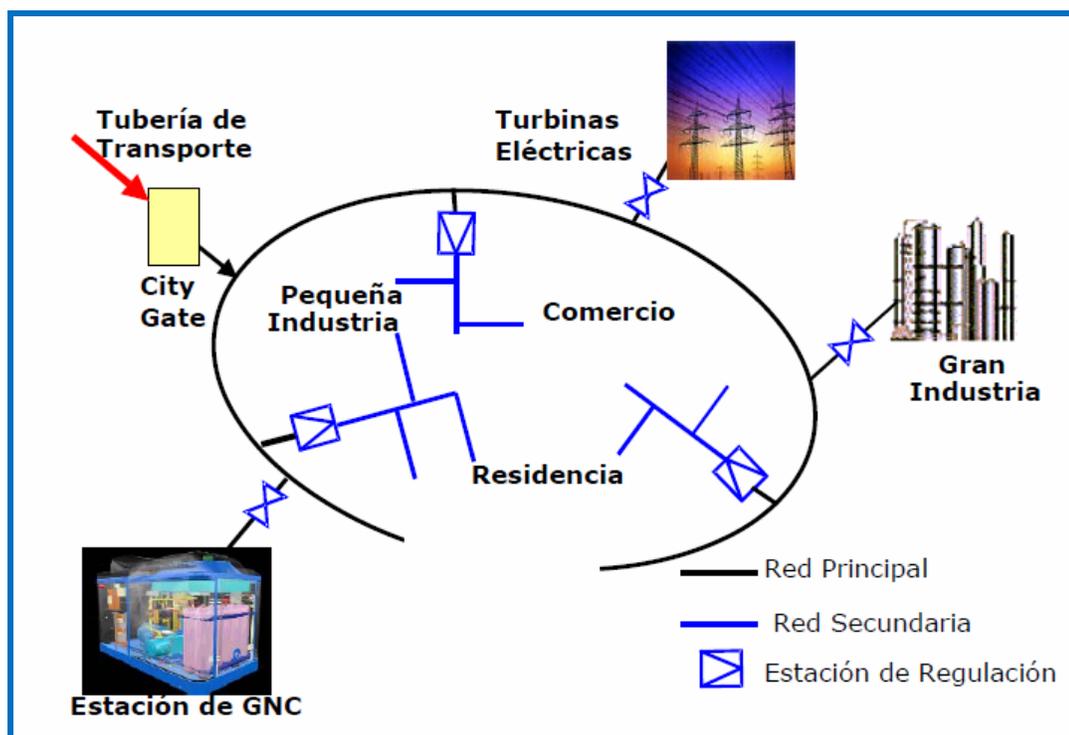


**Figura 2.6.- Gasoductos**

### **2.3.9 Distribución de gas natural**

La distribución viene a ser el suministro de gas natural a los usuarios a través de red de ductos. Por lo general empieza en el City Gate y termina en la puerta del

usuario (*ver figura 2.7*). La distribución se realiza a bajas presiones, normalmente por debajo de los 20 bar.



**Figura 2.7.- Esquema de Distribución del Gas natural**

#### 2.4 Uso industrial del gas natural

El gas natural es el mejor combustible que pueden usar las industrias que utilizan hornos y calderos en sus procesos productivos. Por sus características reemplaza ventajosamente a otros combustibles. En la fabricación del acero es usado como reductor para la producción de hierro esponja. Es también utilizado como materia prima en la industria petroquímica.

El gas natural puede sustituir a los siguientes combustibles: Diesel, Residuales, Gas licuado de petróleo (GLP), Kerosene, Carbón, Leña.

### **2.4.1 Industria del vidrio**

Las propiedades físico-químicas del gas natural han hecho posible la construcción de quemadores que permiten una llama que brinda la luminosidad y la radiación necesarias para conseguir una óptima transmisión de la energía calórica en la masa de cristal. Asimismo es importante mencionar que con el gas natural el producto final (vidrio) sale limpio.

### **2.4.2 Industria de alimentos**

En la producción de alimentos el gas natural se utiliza en los procesos de cocimiento y secado. El gas natural es el combustible que permite cumplir las exigencias de calidad ISO, que son requerimientos para ciertos productos de exportación.

### **2.4.3 Industria textil**

El gas natural permite el calentamiento directo por convección en sustitución del tradicional sistema de calentamiento mediante fluidos intermedios, con el consiguiente ahorro energético (entre el 20 y el 30%).

### **2.4.4 Fundición de metales**

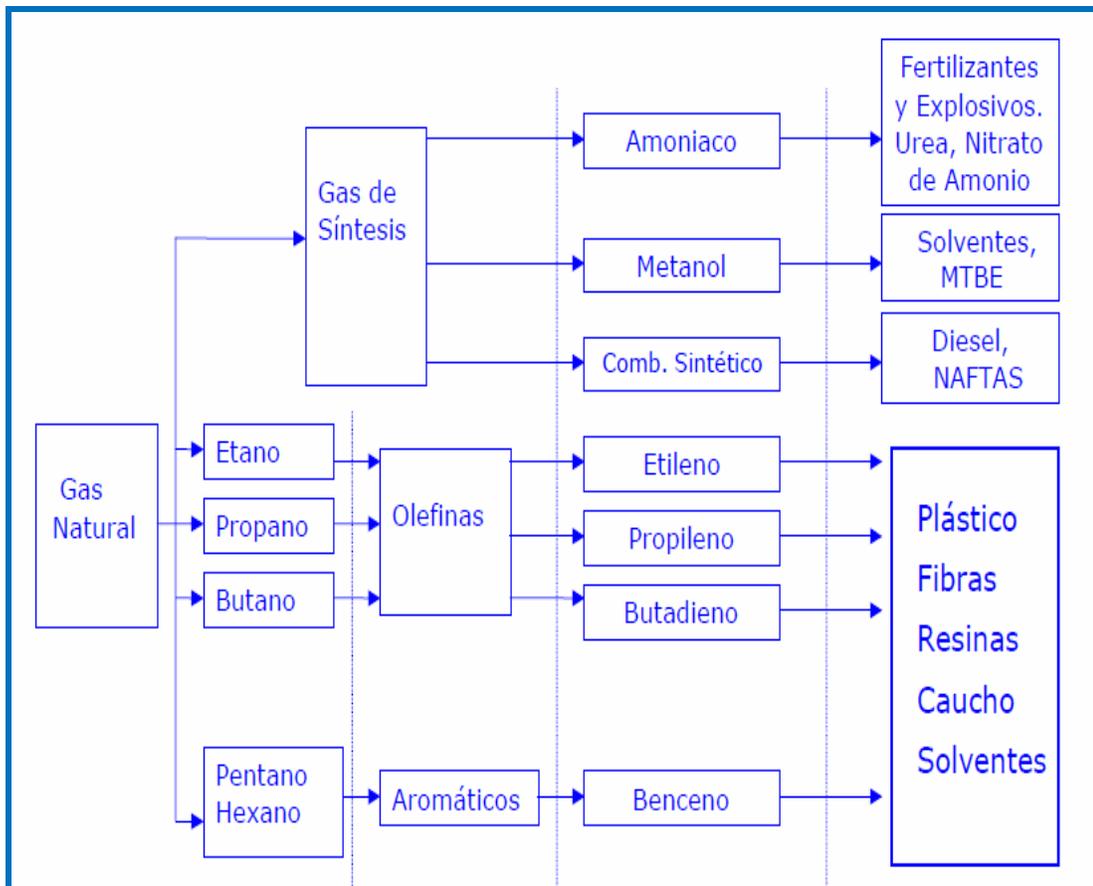
El gas natural ofrece a la industria metalúrgica variadas aplicaciones. Sus características lo hacen apto para todos los procesos de calentamiento de metales, tanto en la fusión como en el recalentamiento y tratamientos térmicos.

### **2.4.5 Generación de electricidad**

El gas natural es el combustible más económico para la generación de electricidad y el que produce menor impacto ambiental. Estas ventajas pueden conseguirse tanto en grandes como en pequeñas centrales termoeléctricas. La generación de electricidad con gas natural es posible mediante turbinas.

## 2.4.6 Petroquímica

El gas natural es materia prima para la fabricación de diversos productos petroquímicos, los cuales se pueden observar en la **Figura 2.8**.



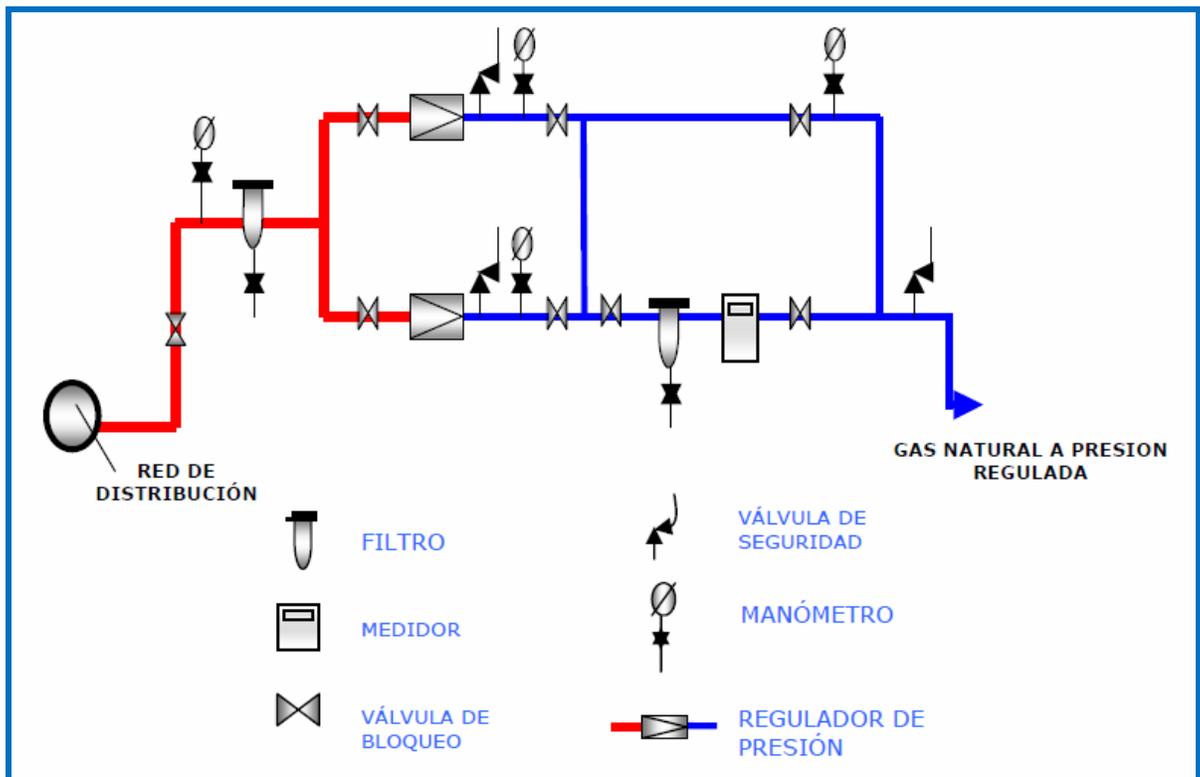
**Figura 2.8.- Productos químicos a partir del gas natural**

## 2.5 Instalaciones de gas natural en la industria

### 2.5.1 Estación de regulación y medición

Es el área en el cual se encuentran instalados los siguientes equipos: filtro, regulador de presión, medidor, válvulas de seguridad (*ver figura 2.9*). En esta área la presión del gas natural del sistema de distribución se reduce a un nivel adecuado para

su uso en la instalación industrial, normalmente de 0,4 bar a 4 bar, también se efectúa la medición del consumo.



**Figura 2.9. Estación de Regulación y Medición**

## 2.5.2 Tuberías

Para la instalación de gas natural a la industria se utilizan tuberías de polietileno, acero y cobre.

### 2.5.2.1 Tuberías de polietileno

Normalmente se usa polietileno en las tuberías instaladas hasta la estación de reducción de presión de la industria.

### 2.5.2.2 Tuberías de acero

Las tuberías de acero se pueden instalar en toda la red de distribución e instalaciones dentro de la industria. No obstante, por su costo normalmente se utilizan en las instalaciones que van de la estación de regulación hasta el aparato de consumo.

### 2.5.2.3 Tuberías de cobre

Las tuberías de cobre también se usan en las instalaciones industriales, normalmente cuando las presiones son inferiores a 7 bar.

**Tabla 2.1.- Ventajas y desventajas de las Tuberías.**

TUBERIAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>Polietileno</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Es económico.</li> <li>▪ Fácil de soldar.</li> <li>▪ Menores costos en instalación, mantenimiento y operación.</li> <li>▪ Facilidad de instalación y manipuleo.</li> <li>▪ No es atacada en ninguna forma por la corrosión.</li> <li>▪ Resistente a movimientos sísmicos.</li> <li>▪ Vida útil, mínima 50 años a 20 ° C.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sólo se usa para presiones inferiores a 7 Bar.</li> <li>▪ Es recomendable para lugares en donde la temperatura es menor a 50°C.</li> <li>▪ No puede estar al aire libre, debe ser enterrado.</li> </ul>
<b>Acero</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Se puede usar para presiones medias y altas.</li> <li>▪ Fácil de soldar.</li> <li>▪ Puede estar al aire libre.</li> <li>▪ Facilidad de instalación y manipuleo.</li> <li>▪ Larga vida útil.</li> <li>▪ Resistentes a altas temperaturas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mayor costo</li> <li>▪ Mayores costos de construcción y mantenimiento.</li> <li>▪ Requiere de revestimiento y protección catódica.</li> </ul>
<b>Cobre</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fácil de soldar.</li> <li>▪ Requieren de menor mantenimiento.</li> <li>▪ Larga vida útil.</li> <li>▪ Son compactas y de menor peso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sólo se puede usar para presiones inferiores a 7 Bar.</li> <li>▪ Mayor costo.</li> </ul>

### **2.5.3 Válvulas**

#### **2.5.3.1 Válvulas de seguridad**

Son válvulas de descarga automática y tienen la función de mantener la presión bajo un límite máximo previamente fijado.

#### **2.5.3.2 Válvulas de bloqueo**

Estas válvulas se diferencian de la anterior porque cortan totalmente el flujo de gas natural que circula por la tubería cuando la presión regulada supera el valor admisible.

### **2.5.4 Filtros**

El filtro tiene por objeto eliminar las impurezas arrastradas por el gas natural en su circulación. Este se coloca antes del Regulador de Presión.

### **2.5.5 Medidores**

Como su nombre indica, sirven para medir el volumen de gas natural consumido por el usuario. Los medidores normalmente utilizados son: **Volumétrico**, medidor de membrana y medidor rotativo; **Velocidad**, turbina.

#### **2.5.1 Medidores de Membrana**

Estos medidores tienen en su interior un diafragma que es presionado por el gas natural que penetra. El volumen ocupado es indicado por el contador que lo expresa en m<sup>3</sup>/h. Son económicos para bajos caudales y presiones.

#### **2.5.2 Medidores Rotativos**

Estos medidores dependen de dos lóbulos en forma de ocho. Los lóbulos giran al pasar el gas natural, de manera que, durante su rotación, cada uno de ellos aísla entre él y el cuerpo un volumen fijo de gas, que es evacuado a través de la salida del

contador. Los contadores rotativos son adecuados para controlar caudales importantes de gas, por ello su aplicación industrial.

### 2.5.3 Medidores de turbina

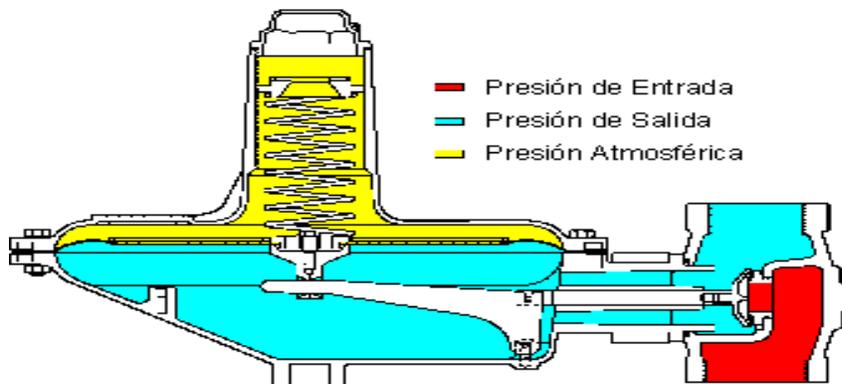
Estos medidores se basan en la medición de la velocidad del gas natural dentro del contador. Permiten medir grandes caudales.

### 2.5.6 Quemadores

Son dispositivos mediante los cuales, el combustible se pone en contacto y se mezcla con el comburente a fin de provocar una combustión eficiente y lograr de ese modo el efecto térmico buscado.

### 2.5.7 Regulador de presión

Los reguladores de presión son aparatos de control de flujo diseñados para mantener una presión constante aguas abajo de los mismos (*ver figura 2.10*). Este debe ser capaz de mantener la presión, sin afectarse por cambios en las condiciones operativas del proceso para el cual trabaja. La selección, operación y mantenimiento correcto de los reguladores garantiza el buen desempeño operativo del equipo al cual provee el gas.



**Figura 2.10.- Regulador de presión**

Los reguladores reductores de presión son equipos de control de flujo diseñados para mantener una presión constante aguas abajo de ellos, independientemente de las variaciones de presión a la entrada o los cambios de requerimientos de flujo. La “carcasa” y los mecanismos internos que componen un regulador, automáticamente controlan o limitan las variaciones de presión a un valor previamente establecido.

Existen diferentes, marcas, estilos y aplicaciones para la industria del Gas Metano. Algunos tipos están constituidos por contenedores autocontrolados que operan midiendo la presión de línea y manteniéndola en el valor fijado, sin necesidad de fuentes externas de energía. Otros modelos requieren de una fuente externa para ejecutar su función de control de la presión.

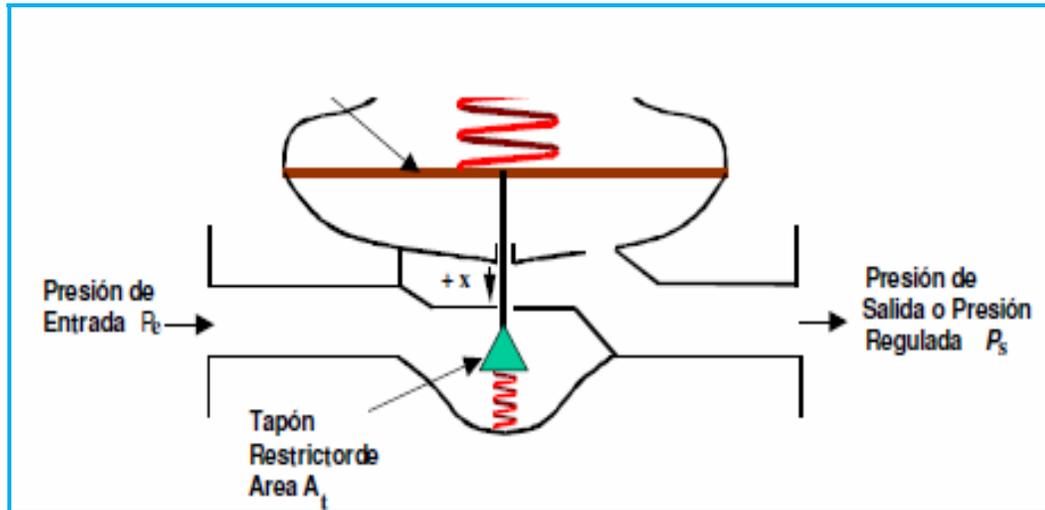
Este suplemento muestra los principios de funcionamiento de los reguladores de Gas Metano, sus dos grandes grupos: los “auto-operados” y los “pilotados”; así como información importante que facilitará la selección del equipo ideal para cada aplicación.

#### **2.5.7.1 Funcionamiento de los reguladores de presión**

Un regulador básicamente es una válvula de recorrido ajustable conectada mecánicamente a un diafragma. El diafragma se equilibra con la presión de salida o presión de entrega y por una fuerza aplicada del lado contrario, a la cara que tiene contacto con la presión de salida. La fuerza aplicada del lado opuesto al diafragma puede ser suministrada por un resorte, un peso o presión aportada por otro instrumento denominado piloto.

El piloto es, por lo general, otro regulador más pequeño o un equipo de control de presión. (En el caso de la *Figura 2.10*, aparte de la carga del resorte, existe la presión ejercida por el aire (presión atmosférica)).

Para comprender el funcionamiento de los reguladores, la **Figura 2.11** muestra un diagrama esquemático de regulador auto-operado.



**Figura 2.11.- Regulador de Presión Auto-Operado**

Los reguladores auto-operados funcionan bajo el principio de equilibrio de fuerzas. Esencialmente, las fuerzas aplicadas en la zona de alta presión ( $P_e$ ), aguas arriba, se equilibran o balancean con las fuerzas de la zona de baja presión ( $P_s$ ), aguas abajo. Este equilibrio de fuerzas es causado por la distribución de la energía (presión) en áreas desiguales, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$F = P.A \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

Donde;

$F$ = Fuerza (Lbf) ó (Nw)

$A$ = Area (in<sup>2</sup>) ó (m<sup>2</sup>)

$P$ = Presión (Lbf/ in<sup>2</sup>) ó (Kpa)

De acuerdo a esto (**Ecuación 2.1**), la fuerza que actúa en la zona de baja presión, se distribuye en una superficie más grande que la fuerza que se aplica en la

zona de alta presión. Debido a la diferencia de áreas se logra el equilibrio entre ambas zonas (*Ecuación 2.2*).

$$F_1 \cdot A_1 = F_2 \cdot A_2 \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

La fuerza a la entrada puede ser considerada como fuerza de apertura, la cual se balancea a su vez con la fuerza de cierre. Para ajustar la presión aguas abajo, se introduce una tercera fuerza en la ecuación, esta fuerza es llamada fuerza de control, ejercida por un resorte o artefacto que suministra una presión o energía adicional. En el caso del regulador esquemático la fuerza de control la suministra un resorte y se considera como parte de la fuerza de apertura. El equilibrio matemático de fuerzas se expresaría de la siguiente manera:

$$F_{\text{entrada}} + \text{Fuerza resorte} = F_{\text{salida}} \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

El equilibrio de fuerzas de apertura y cierre de la válvula reguladora se lleva a cabo mientras el equipo opera en estado de flujo estable. Con base en las *Ecuaciones 2.2 y 2.3*, se reconoce que si la presión de entrada permanece constante los cambios en la presión de salida son compensados por cambios en la fuerza que aplica el resorte, logrando así el balance.

La fuerza ejercida por el resorte se expresa con la siguiente ecuación, conocida como “Ley de Hooke”.

$$F = - K \cdot X \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

Donde;

F= Fuerza (Lbf) ó (Nw)

$K$ = Constante de elasticidad del resorte (Lbf/in) o (Nw/m)

$X$ = Deformación del resorte, (in) ó (m)

A medida que el vástago de la válvula reguladora se desplaza el resorte se deforma, cambiando de esa manera la fuerza ejercida por el resorte. Los cambios en la fuerza suministrada por el resorte significan cambios en la presión de entrega.

### 2.5.7.2 Elementos que componen un regulador

En esencia un regulador está compuesto por tres elementos:

- ✓ **Elemento restrictor:** orificio de la válvula y tapón.
- ✓ **Elemento de medida o sensor:** diafragma y conductos o tubing.
- ✓ **Elemento de Carga:** Resorte, gas comprimido o gas regulado suministrado por un piloto.

Un regulador típico es una válvula de globo en la cual el vástago se mueve por la interacción de un diafragma. El vástago es solidario al diafragma y su cambio de posición es transferido al vástago, modificando el área de la sección transversal que atraviesa la corriente de flujo. El movimiento del diafragma está “limitado” o “controlado” por un resorte que actúa del lado opuesto al área que sensa la presión de entrega o presión a controlar. La presión de entrada actúa sobre el área proyectada del tapón.

Para alcanzar el balance de fuerzas, el área del diafragma debe ser mayor que el área proyectada del tapón. En el diseño y fabricación de reguladores, la relación de superficies diafragma/tapón es un factor muy importante para determinar la precisión y sensibilidad del equipo.

### 2.5.7.3 Tipos de Reguladores-Características

Existen dos (2) grandes categorías de reguladores: los auto-operados y los pilotados o accionados con fuentes externas:

#### 2.5.7.3.1 Reguladores Auto-Operados:

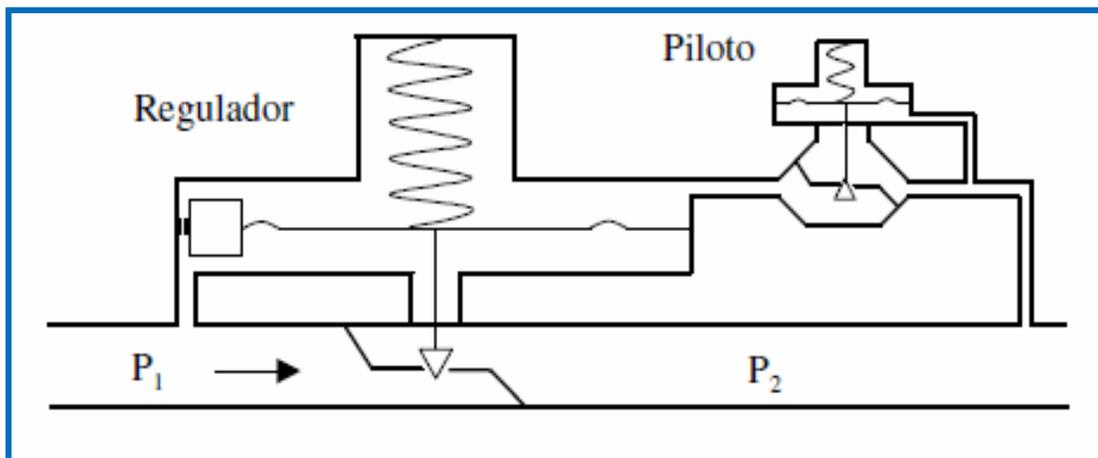
La principal característica de los reguladores auto-operados es que disponen de menos partes móviles. La particularidad de contar con un resorte como único ajuste en la presión de entrega le confiere una ventaja en las labores de operación y mantenimiento, sin embargo esta simplicidad presenta desventajas operativas:

- **Desbalance:** De acuerdo a la Ecuación 3 al incrementar la fuerza del resorte se aumenta el nivel de presión a la salida. Un cambio en la presión de entrada también afecta la presión de salida. Ello se debe a la relación existente entre el área del diafragma y el área tapón-orificio. (Por ejemplo una variación de 100 psig. en la presión de entrada, en un regulador cuya relación área diafragma/área tapón-orificio sea de 100:1, significa una variación en la presión de entrega de 1 psig).
- **Decaimiento de presión:** Es el cambio en la presión de salida por efecto del desplazamiento del vástago. En equilibrio, cuando el regulador está cerrado, el resorte imprime una fuerza de acuerdo a la Ley de Hooke (ecuación 4). A medida que el vástago de la válvula se desplaza, el resorte se deforma, modificando la fuerza que transmite al diafragma. Los cambios en la fuerza que imprime el resorte, implican a su vez cambios en la presión de salida. Si la fuerza del resorte a lo largo del recorrido del vástago permaneciera constante, no se presentaría el efecto de decaimiento de presión. Este efecto es de particular relevancia en servicios de alta presión donde se requieren resortes de alta resistencia. En estos casos el fabricante ofrece una variedad de rangos, donde debemos seleccionar

aquel que implique menos deflección del resorte para el nivel de presión de entrega a regular.

- **Error de medición:** De acuerdo a las características internas del regulador, existe una determinada caída de presión a lo largo del recorrido del fluido por los ductos internos del equipo. Esta caída interna de presión se incrementa a medida que crece el caudal que fluye por el artefacto. Los cambios internos de presión, por efecto del flujo, causan inexactitudes en la medición de la presión de salida por parte del diafragma, variando la presión de ajuste del regulador.
- **Recuperación de Presión:** Cuando un regulador abre completamente, requiere de una fuerza adicional que devuelva el vástago a su posición original o de cierre hermético. Esa fuerza adicional es suministrada por la presión de entrada y por otro resorte (reten). En ambos casos la fuerza de retorno implica una fuerza de entrada adicional que afecta la presión de salida. El efecto es importante cuando el requerimiento de flujo es inestable y no se desean cambios en la variación de la presión de entrega.

(En la **Figura 2.12** se ilustra gráficamente el comportamiento de un regulador con la representación de los efectos explicados anteriormente).

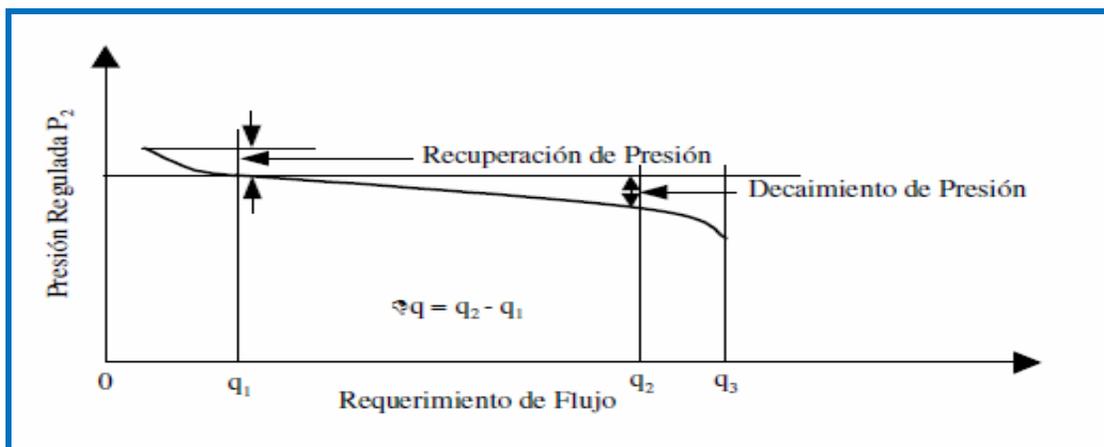


**Figura 2.12. Curva Típica de Desempeño de un Regulador**

Estos efectos son considerados en el diseño de un regulador y debe buscarse su compensación a la hora de seleccionar el equipo apropiado para cada caso. (Por ejemplo, seleccionando el resorte con un rango de operación cercano al margen de trabajo práctico podemos lograr que el decaimiento no sea muy alto y que este, a su vez, contribuya a que la recuperación de presión y no afecte en gran medida la presión de entrega. No obstante, cuando el proceso exige márgenes muy cortos de variación se recomienda el uso de reguladores pilotados).

### 2.5.7.3.2 Reguladores Pilotados:

Los reguladores pilotados están conformados por un pequeño regulador, o piloto, que es utilizado como control del regulador principal (*Fig. 2.13*). El piloto, amplificador o multiplicador tiene la habilidad de traducir los pequeños cambios en la presión aguas abajo, en grandes cambios aplicados sobre el instrumento de medida (diafragma). El incremento relativo en la presión de salida del piloto versus el cambio en la presión de entrega del regulador principal se le denomina ganancia. (Por ejemplo, si el cambio de 1psig. en la presión de ajuste del regulador principal significa un cambio de 10 psig en la presión de salida del piloto, quiere decir que el piloto tiene una ganancia de 10).



**Figura 2.13. Esquemático de un regulador pilotado.**

El fenómeno de ganancia le confiere al regulador pilotado su exactitud. (Por ejemplo, un regulador que tenga un decaimiento de presión del 10 psig, con apertura completa, si se le adiciona un piloto con una ganancia de 20, el decaimiento se convierte en  $10/20 = 0,5$  psig.).

Una alta ganancia del piloto permite el movimiento rápido del vástago, desde el nivel de completamente cerrado a completamente abierto, con el mínimo cambio de presión aguas abajo; permitiendo una regulación más precisa dentro del margen de flujo.

El incremento en la sensibilidad del piloto y la reducción del decaimiento de presión es una ventaja relativa. La ganancia del piloto incrementa sensibilidad, causando el incremento de la ganancia de todo el sistema. Esto puede causar inestabilidad en lazos de regulación o regulaciones en serie, manifestándose como fluctuaciones periódicas o golpeteo al más mínimo cambio de presión en el sistema. Una ganancia muy pequeña resulta en una respuesta lenta del regulador, la cual se manifiesta como variaciones por defecto o exceso de la presión de entrega.

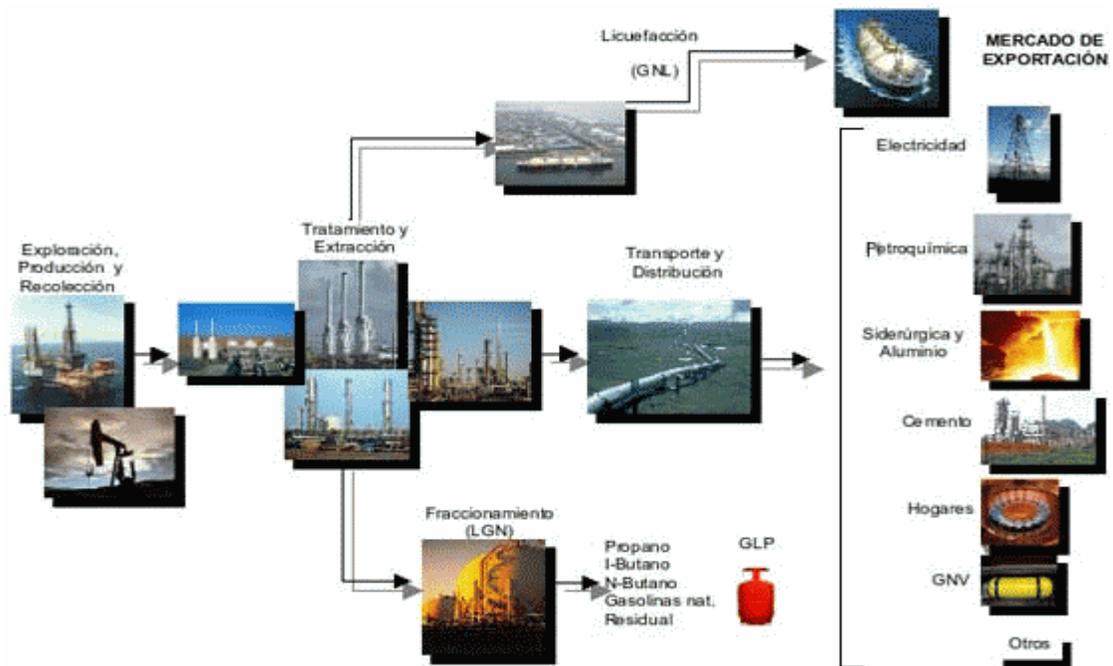
Para garantizar una correcta operación, el piloto debe ser configurado y seleccionado acorde con el regulador principal. Las conexiones y elementos de medición de presión deben tener un arreglo que permita el control y ajuste de la presión de entrega adecuadamente, es decir, se debe contemplar la instalación de orificios o válvulas de aguja, así como válvulas de alivio o de cierre rápido. Los primeros permitirán la puesta a punto en campo del equipo y los segundos protegerán el sistema en caso de fallas.

El piloto, por lo general, es un regulador pequeño y económico, comparado con el regulador principal. Esto permite una gran flexibilidad para ajustar parámetros que afectan el desempeño del sistema. Modificando el piloto se puede adaptar el

regulador principal a las condiciones específicas de nuestro proceso. (Por ejemplo, la sensibilidad puede ser ajustada cambiando el orificio del piloto, el resorte del piloto, el diafragma, las conexiones o tubos que sensan la presión e incluso hacer cambios en el regulador principal acorde con los cambios del piloto). Existen muchas opciones y arreglos en reguladores pilotados y al manejar sistemas de regulación en serie o paralelo, la gama de alternativas para eliminar cualquier problema o desajuste es bastante amplia.

## 2.6 Cadena de valores del gas natural

El proceso de producción del gas natural es simple y muy parecido al del petróleo (*Fig. 2.14*). Primero, el gas natural se extrae por medio de perforaciones en pozos terrestres o en los océanos, después se transporta por gasoductos (por tierra) o buques (por mar) hasta la planta de depurado y transformación para ser conducido después hacia una red de gas o a las zonas de almacenamiento.



**Figura 2.14.- Cadena de Valores del Gas Natural**

### **2.6.1 Exploración**

La exploración es una etapa muy importante del proceso. En el transcurso de los primeros años de la industria del gas natural, cuando no se conocía muy bien el producto, los pozos se perforaban de manera intuitiva. Sin embargo, hoy en día, teniendo en cuenta los elevados costos de extracción, las compañías no pueden arriesgarse a hacer excavaciones en cualquier lugar. Los geólogos juegan un papel importante en la identificación de napas de gas. Para encontrar una zona donde es posible descubrir gas natural, analizan la composición del suelo y la comparan a las muestras sacadas de otras zonas donde ya se ha encontrado gas natural. Posteriormente llevan a cabo análisis específicos como el estudio de las formaciones de rocas a nivel del suelo donde se pudieron haber formado napas de gas natural. Las técnicas de prospección han evolucionado a lo largo de los años para proporcionar valiosas informaciones sobre la posible existencia de depósitos de gas natural. Cuanto más precisas sean las técnicas, mayor será la posibilidad de descubrir gas durante una perforación.

### **2.6.2 Extracción**

El gas natural se extrae cavando un hueco en la roca. La perforación puede efectuarse en tierra o en mar. El equipamiento que se emplea depende de la localización de la napa de gas y de la naturaleza de la roca. Si es una formación poco profunda se puede utilizar perforación de cable. Mediante este sistema una broca de metal pesado sube y baja repetidamente en la superficie de la tierra. Para prospecciones a mayor profundidad, se necesitan plataformas de perforación rotativa. Este método es el más utilizado en la actualidad y consiste en una broca puntiaguda para perforar a través de las capas de tierra y roca

Una vez que se ha encontrado el gas natural, debe ser extraído de forma eficiente. La tasa de recuperación más eficiente representa la máxima cantidad de gas

natural que puede ser extraída en un período de tiempo dado sin dañar la formación. Varias pruebas deben ser efectuadas en esta etapa del proceso.

Lo más común es que el gas natural esté bajo presión y salga de un pozo sin intervención externa. Sin embargo, a veces es necesario utilizar bombas u otros métodos más complicados para obtener el gas de la tierra. El método de elevación más difundido es el bombeo de barra.

### **2.6.3 Transporte y almacenamiento.**

Una vez tratado, el gas natural pasa a un sistema de transmisión para poder ser transportado hacia la zona donde será utilizado. El transporte puede ser por vía terrestre, a través de gasoductos que generalmente son de acero y miden entre 20 y 42 pulgadas de diámetro. Debido a que el gas natural se mueve a altas presiones, existen estaciones de compresión a lo largo de los gasoductos para mantener el nivel necesario de presión.

Comparado a otras fuentes de energía, el transporte de gas natural es muy eficiente si se considera la pequeña proporción de energía perdida entre el origen y el destino. Los gasoductos son uno de los métodos más seguros de distribución de energía pues el sistema es fijo y subterráneo.

El gas natural puede también ser transportado por mar en buques. En este caso, es transformado en gas natural licuado (GNL). El proceso de licuado permite retirar el oxígeno, el dióxido de carbono, los componentes de azufre y el agua. Los elementos principales de este proceso son una planta de licuado, barcos de transporte de baja temperatura y presurizados y terminales de regasificación.

Antes de llegar al consumidor, el gas natural puede ser almacenado en depósitos subterráneos para que la industria del gas pueda afrontar las variaciones

estacionales de la demanda. Estos depósitos están generalmente situados cerca de los mercados consumidores de tal forma que las empresas de distribución de gas natural pueden responder a los picos de la demanda y proporcionar el gas a sus clientes continuamente y sin demora. Durante los períodos de poca actividad, las empresas de distribución pueden vender el gas natural en el mercado físico (spot).

## **2.7 Procesamiento del gas natural**

Se entiende como procesamiento del gas, la obtención a partir de la mezcla de hidrocarburos gaseosos producida en un campo, de componentes individuales como etano, propano y butano.

El caso más sencillo de procesamiento del gas natural es removerle a este sus componentes recuperables en forma de líquidos del gas natural (NGL) y luego esta mezcla líquida separarla en LPG y NGL. Cuando del proceso se obtiene con un alto grado de pureza C2, C3 y C4 se conoce como fraccionamiento.

El procesamiento del gas natural se puede hacer por varias razones:

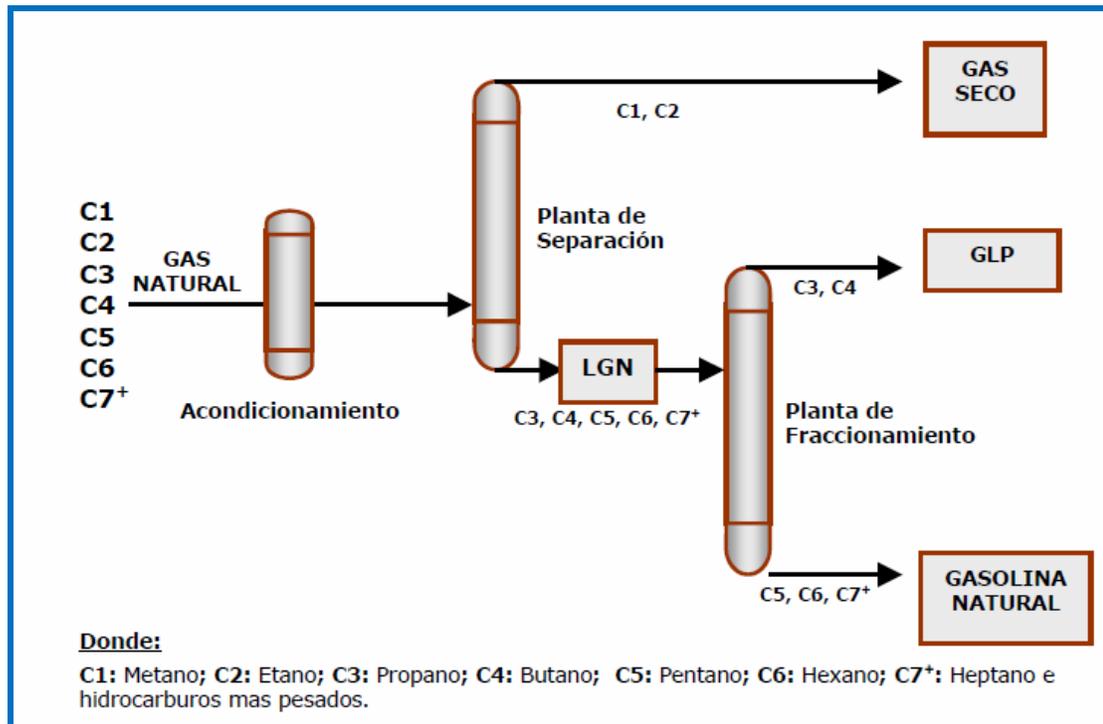
- ✓ Se necesitan para carga en la refinería o planta petroquímica materiales como el etano, propano, butano.
- ✓ El contenido de componentes intermedios en el gas es apreciable y es más económico removerlos para mejorar la calidad de los líquidos.
- ✓ El gas debe tener un poder calorífico determinado para garantizar una combustión eficiente en los gases domésticos, y con un contenido alto de hidrocarburos intermedios el poder calorífico del gas puede estar bastante por encima del límite exigido.

Se habla básicamente de tres métodos de procesamiento del gas natural: Absorción, Refrigeración y Criogénico. El primero es el más antiguo y el menos usado actualmente; consiste en poner en contacto el gas con un aceite, conocido como

aceite pobre, el cual remueve los componentes desde el C2 en adelante; este aceite luego se separa de tales componentes. El método de refrigeración es el más usado y separa los componentes de interés en el gas natural aplicando un enfriamiento moderado; es más eficiente que el método de absorción para separar del C3 en adelante. El proceso criogénico es el más eficiente de los tres, realiza un enfriamiento criogénico (a temperaturas muy bajas, menores de  $-100^{\circ}\text{F}$ ) y se aplica a gases donde el contenido de intermedios no es muy alto pero requiere un gas residual que sea básicamente metano.

En el procesamiento del gas (*ver figura 2.15*), se obtiene los siguientes productos:

- **Gas Residual o Pobre.** Compuesto por metano básicamente y en algunos casos cuando no interesa el etano, habrá porcentajes apreciables de éste.
- **Gases Licuados del Petróleo (LPG).** Compuestos por C3 y C4; pueden ser compuestos de un alto grado de pureza (propano y butano principalmente) o mezclas de éstos. La tabla 26 muestra las características de algunos compuestos o mezclas de LPG.
- **Líquidos del Gas Natural (NGL).** Es la fracción del gas natural compuesta por pentanos y componentes más pesados; conocida también como gasolina natural.



**Figura 2.15.- Procesamiento del Gas natural**

## 2.8 Tratamiento del gas natural

El gas producido en los campos de petróleo y gas, viene acompañado de hidrocarburos líquidos; agua, en estado líquido y vapor y otros contaminantes, y a unas condiciones de presión y temperatura normalmente altas; esto hace que antes de poder usar el gas como combustible se deba someter a procesos de tratamiento cuyo objetivo es llevarlo a unas características estándar de composición, presión y temperatura para hacer su uso eficiente y seguro.

El proceso a que es sometido el gas varía de un gas a otro, dependiendo del tipo de gas y del uso que se le vaya a dar finalmente a éste, pero en general se han establecido una serie de características que se deben controlar en cualquier gas, ya que de no ser así se puede presentar problemas en su uso.

El agua se debe remover del gas porque su presencia puede ocasionar problemas de corrosión, taponamiento de válvulas o tuberías por hidratos, reducción de capacidad de la tubería, etc.

El poder calorífico del gas depende de su composición, se debe controlar para buscar una combustión eficiente y evitar la presencia de hidrocarburos intermedios (C3 - C4 especialmente) que son más valiosos si se comercializan aisladamente y su presencia en el gas pueden hacer que se tenga una combustión incompleta.

Un gas natural con presencia de  $H_2S$  y  $CO_2$  se conoce como gas agrio y estos gases, especialmente el  $H_2S$ , son altamente perjudiciales. El  $CO_2$  en presencia de agua líquida forma el ácido carbónico que puede inducir problemas de corrosión; además cuando el gas se somete a procesos criogénicos se solidifica. Por su parte el  $H_2S$  es altamente tóxico y en presencia de agua también origina problemas de corrosión y simultáneamente la fragilización del acero. El  $H_2S$  y el  $CO_2$  se conocen como gases ácidos.

El control de la composición del gas, buscando que tenga un contenido mínimo de hidrocarburos intermedios, se hace a través de su poder calorífico, el índice de Wobe y el punto de rocío. El índice de Wobe es un parámetro importante cuando se debe mezclar gases o cuando se requiere intercambiabilidad; para que la combustión no se afecte al mezclar o intercambiar gases, los gases involucrados no deben tener diferencias mayores de un 10% en su índice de Wobe. El punto de rocío es un indicativo del contenido de hidrocarburos intermedios, mientras más bajo sea este a unas condiciones de presión dadas, menor será el contenido de este tipo de hidrocarburos.

La presión y la temperatura de entrega del gas en el campo son importantes para garantizar que el gas puede llegar sin problemas al punto de consumo; si la presión no

es suficiente será necesario instalar sistemas de compresión, modificar el sistema de producción o reducir el volumen de entrega. La temperatura de entrega es importante para garantizar que no haya problemas de condensación o de formación de hidratos en la línea del gasoducto.

La **Tabla 2.2** muestra las principales características que se deben controlar en el gas y los valores típicos promedios que normalmente se establecen para cada una de ellas; estos valores pueden variar de una región a otra o de un país a otro.

**Tabla 2.2.- Características Requeridas en el Gas.**

<b>Poder Calorífico</b>	Del Orden de 1000 BTU/PCN.
<b>Contenido de Agua</b>	Normalmente de 5-10 lbs. /MPCN. Cuando se va a aplicar procesos criogénicos deben ser de 1 PPM aproximadamente.
<b>Contenido de CO<sub>2</sub></b>	Normalmente 2% V. Cuando el gas se va a someter a procesos criogénicos deben ser mucho menor.
<b>Contenido de H<sub>2</sub>S</b>	Normalmente 1/4 de grano /100 PCN (4 PPM en volumen).
<b>Índice de Wobe</b>	$W = \frac{\text{Poder Calorífico Bruto}}{\gamma_g^{1/2}}$
<b>Contenido de Hidrocarburos intermedios</b>	Poder calorífico $\approx$ 1000 BTU/PCN. Punto de Rocío 18°F a 1000/PC
<b>Contenido de Nitrógeno</b>	Afecta poder calorífico. Se pueden producir gases de Nitrógeno perjudiciales.

Un esquema general de procesos de tratamiento del gas se muestra en la **figura 2.16**. El gas llega a la cabeza de los pozos a unas condiciones de presión y temperatura altas y es necesario bajarle la presión. Al hacer esto el gas se enfría y puede ser necesario calentarlo para evitar problemas de condensación y formación de hidratos; el calentamiento se puede hacer con intercambiadores o unidades LTX. En la separación a alta presión se separa el gas y el líquido, el líquido normalmente es agua e hidrocarburos y también se pueden separar en el mismo recipiente de alta presión. Los hidrocarburos líquidos pasan a un proceso de estabilización donde se termina de remover los hidrocarburos que se evaporan al disminuir la presión; estos



El proceso de tratamiento involucra la regeneración del material o equipo usado en el proceso y la disposición final del azufre.

Después del endulzamiento el gas debe salir con los niveles requeridos de  $H_2S$  y  $CO_2$  pero el contenido de agua es alto porque ésta que está en forma de vapor en el gas, no ha sido removida, aunque existen algunos procesos de endulzamiento que también remueven agua, y además muchos de los procesos de endulzamiento involucran agua; por tanto el gas debe pasar a deshidratación.

En la deshidratación se remueve el agua que está en el gas en estado de vapor, ya que el agua que está en estado líquido se removió en la separación a alta presión. La deshidratación es necesaria aplicarla cuando el contenido de agua en el gas es alto o cuando se prevé que se pueden presentar hidratos. El contenido de agua en un gas depende de la composición de este, la presión y la temperatura; puede ser tan alto como 500 o más libras por MPCN. Básicamente se tienen en aplicación dos métodos de deshidratación y la aplicación de uno u otro depende del contenido inicial de agua, el volumen de gas y el contenido final de agua aceptable en el gas. En la deshidratación también está incluido el proceso de regeneración para el material o equipo utilizado para deshidratar. Después de la deshidratación, el gas puede ser sometido a un proceso conocido como procesamiento o fraccionamiento, en el cual se le remueven los componentes más pesados, básicamente del  $C_2$  en adelante, con el fin de ajustar el gas a los requerimientos de calor específico, punto de rocío o índice de Wobe. Este paso se aplica básicamente a los gases húmedos, asociados o gases provenientes de un yacimiento de condensado. En este proceso se obtiene el etano que es un material muy valioso en las plantas petroquímicas, el propano y butano (LPG) y la gasolina natural. La fase gaseosa que sale de este último paso es lo que se conoce como gas natural, en su composición es básicamente metano, y está listo para ser llevado a los consumidores de gas como combustible; su transporte se puede hacer

en forma gaseosa a través de tuberías o en forma líquida en metaneros, en este último caso el gas se debe someter a un proceso de licuefacción conocido como criogenia.

La configuración de un sistema de tratamiento para el gas depende de factores como condiciones de temperatura y presión a las que está llegando el fluido a superficie, características de la mezcla producida, requerimientos de calidad de los productos finales, medio de transporte que se va a utilizar para los productos y ubicación del campo de gas con respecto a los sitios de consumo, regulaciones legales para las actividades de producción y manejo, etc. A continuación se muestra un resumen de algunos de estos factores. Además esta configuración normalmente varía con el tiempo porque a medida que se va produciendo el yacimiento las características de la producción cambian al igual que los esquemas de producción y desarrollo del campo.

### **2.8.1 Factores que afectan el diseño de un sistema para tratamiento del gas.**

- Cantidad y Calidad del Fluido a Procesar.
- Demanda de los Productos a Obtener (Cantidad y Precio).
- Reglamentaciones Legales. Prohibiciones de Quemar Gas, Prorrato, Contratos, Convenios, etc.
- Factores Ambientales: Disponibilidad y Calidad de Mano de Obra, Clima, Costumbres Locales,
- Niveles de Riesgo: Tecnológicos, Políticos, Económicos.
- Cantidad y Calidad de Datos Disponibles

### **2.8.2 Efectos del contaminante**

La presencia de  $H_2S$  debe ser tomada como un problema crítico tanto para las personas como para los equipos e instalaciones involucradas en los procesos de producción de petróleo y combustibles debido a que el  $H_2S$  es un gas altamente

tóxico, inflamable, corrosivo, de mayor densidad que el aire y el cual es frecuente encontrar tanto en los campos como en la refinerías de petróleo. Los niveles observados van desde trazas de H<sub>2</sub>S hasta valores por encima de 1000 ppm. A continuación se resume las características principales y sus efectos sobre la salud.

**Tabla 2.3.- Propiedades físico químicas de H<sub>2</sub>S**

<b>Color</b>	Incoloro	<b>Volumen específico. (21°C, 1 atm)</b>	11.2 Ft <sup>3</sup> /lb
<b>Olor</b>	Huevo podrido	<b>Densidad del liquido (0°C)</b>	1.54 g/l
<b>Olor detectable al humano</b>	0.0094 ppm	<b>Solubilidad en agua (20°C)</b>	2.9%
<b>Punto ebullición</b>	-61 °C	<b>pH (solución saturada)</b>	4.5
<b>Punto congelamiento</b>	-86 °C	<b>Límites mezcla explosiva</b>	4.3 – 46 %
<b>Presión vapor (25°C)</b>	15200 mm Hg	<b>Auto ignición</b>	260°C
<b>Densidad del vapor (aire=1)</b>	1.189	<b>Peso molecular</b>	34.08

### 2.8.2.1 Sobre las personas:

El H<sub>2</sub>S es un gas incoloro y extremadamente toxico. Tiene un olor muy desagradable similar al de huevos podridos, pero solo en bajas concentraciones, pues por encima de las 100 ppmv el gas elimina el sentido del olfato rápidamente. Es más pesado que el aire, por lo que tiende a acumularse en zonas bajas, lo que aumenta su peligrosidad. Es un gas combustible en concentraciones de 4 a 45 % en volumen de aire.

Los efectos fisiológicos del gas sobre el organismo dependen de la concentración, del tiempo de exposición, de la frecuencia de exposición, y del individuo. El mayor peligro reside en su acción paralizante sobre la respiración.

**Tabla 2.4.- Efectos del H<sub>2</sub>S sobre la salud.**

Concentración	Efecto
10 ppmv	Límite máximo para trabajo prolongado (8 hrs.) Olor muy desagradable, dolores de cabeza.
15 ppmv	Límite de exposición para trabajos cortos (15 min.)
20 ppmv	Límite máximo recomendado para trabajo sin equipos respiratorios de protección. Irritación de ojos y tracto respiratorio en 1 hrs.
50 ppmv	Pérdida del olfato en 15 min.; dolores de cabeza, mareos en 1. hrs.
100 ppmv	Tos, pérdida del olfato en 3 - 15 min. Respiración alterada, dolor de ojos y vahídos en 1 hrs.
200 ppmv	Rápida pérdida del olfato y ardor de ojos y tracto respiratorio.
500 ppmv	Pérdida de capacidad de razonamiento y equilibrio; inconsciencia ante una corta exposición. Paro respiratorio, necesidad de rápida resucitación cardiovascular.
700 ppmv	Inconsciencia y paro respiratorio muy rápidos. La muerte o daño cerebral permanente pueden ocurrir si la víctima no es rescatada rápidamente.
1000 ppmv	Inconsciencia inmediata, muerte en pocos minutos.

Si se quema gas con H<sub>2</sub>S, (en motores, antorchas, quemadores, hornos, etc.) se producirá SO<sub>2</sub> como subproducto de la combustión. Este gas es también tóxico, produciendo irritación del tracto respiratorio superior, inflamación de mucosas, tos, y ardor en los ojos en concentraciones de hasta 100 ppmv. Puede producir bronquitis, neumonía crónica o muerte por asfixia en concentraciones mayores y exposiciones prolongadas.

#### **2.8.2.2 Sobre el Medio Ambiente:**

Los efectos de venteos de gases a la atmósfera solo pueden ser evaluados en gran escala y a largo plazo, pues hay pocas fuentes de emisión tan grandes como para resultar responsables directamente responsables de efectos identificables. La suma de contribuciones pequeñas, sin embargo, produce efectos notables en el largo plazo. Esta característica de la contaminación atmosférica hace que las medidas de cuidado

ambiental sean difíciles de aceptar y adoptar, tanto por los gobiernos como por la población.

La emisión de compuestos de azufre, como el  $\text{SO}_2$  (dióxido de azufre) resultante de la combustión masiva de combustibles con azufre, es responsable de daños importantes a la vegetación y a las propiedades circundantes a la fuente. El mecanismo responsable de este daño es llamado "lluvia ácida". El  $\text{SO}_2$  se transforma en la atmósfera en ácido sulfúrico, que luego regresa a la superficie con la lluvia en las zonas cercanas a la emisión, donde la concentración de  $\text{SO}_2$  es alta.

Plantas de proceso o de generación de energía, donde el combustible utilizado es carbón con alto contenido de azufre, son los ejemplos más conocidos de estas fuentes de contaminación. La quema de gas natural con  $\text{H}_2\text{S}$  podría producir efectos similares dependiendo de la escala.

### **2.8.2.3 Sobre los equipos:**

El  $\text{H}_2\text{S}$  es extremadamente corrosivo para los metales usados en los contactos eléctricos. Una máquina expuesta a un escape de  $\text{H}_2\text{S}$  por cierto tiempo, no debe ser considerada apta para trabajar, hasta ser sometida a un examen riguroso de sus sistemas eléctricos.

Asimismo, el  $\text{H}_2\text{S}$  es corrosivo para el acero de las cañerías y recipientes que lo contienen, lo que se soluciona adoptando sobreesesores de corrosión normales. Sin embargo, esta corrosión puede ser severa si el gas transporta agua libre, y más aún si hay  $\text{CO}_2$  (anhídrido carbónico) presente. En este caso, se deberá recurrir a un recubrimiento epoxi muy bien aplicado.

Los fabricantes de motores y compresores alternativos normalmente aceptan concentraciones de  $\text{H}_2\text{S}$  en el gas combustible o de proceso respectivamente, de hasta

50 ppmv. Para concentraciones mayores, se especifican materiales especiales para las partes en contacto con el gas.

El  $H_2S$  reacciona con los óxidos de hierro del acero formando sulfuro de hierro. Cuando esta superficie atacada es puesta en contacto con el aire, el sulfuro de hierro se oxida formando nuevamente óxidos de hierro y azufre elemental, con gran liberación de calor. Este calor generado puede encender los materiales combustibles cercanos, como hidrocarburos.

Aparte de la formación de  $FeO$  (monóxido de hierro), la corrosión por  $H_2S$  en medio acuoso, es responsable de fisuras en el material base y en soldaduras, por varios mecanismos: SSC (Sulfide Stress Cracking), HIC (Hydrogen Induced Cracking) y SOHIC (Stress Oriented Hydrogen Induced Cracking). Se considera que estos mecanismos de fisura se producen a partir de 50 ppmv de concentración de  $H_2S$ . El estudio de estos mecanismos de corrosión es relativamente nuevo, y ha recibido atención en los Estados Unidos después de ciertas fallas catastróficas en recipientes sometidos a presión. La selección del acero es muy importante para evitarla, siendo la característica más importante de los aceros que están siendo desarrollados, una baja dureza superficial. Esto implica además, un adecuado postratamiento térmico de las soldaduras, y ensayos de fisuras con líquidos fluorescentes.

## **2.9 Procesos industriales de endulzamiento del gas natural**

El endulzamiento del gas se hace con el fin de remover el  $H_2S$  y el  $CO_2$  del gas natural. Como se sabe el  $H_2S$  y el  $CO_2$  son gases que pueden estar presentes en el gas natural y pueden en algunos casos, especialmente el  $H_2S$ , ocasionar problemas en el manejo y procesamiento del gas; por esto hay que removerlos para llevar el contenido de estos gases ácidos a los niveles exigidos por los consumidores del gas. El  $H_2S$  y el  $CO_2$  se conocen como gases ácidos, porque en presencia de agua forman ácidos, y un gas natural que posea estos contaminantes se conoce como gas agrio.

Entre los problemas que se pueden tener por la presencia de  $H_2S$  y  $CO_2$  en un gas se pueden mencionar:

- ✓ Toxicidad del  $H_2S$ .
- ✓ Corrosión por presencia de  $H_2S$  y  $CO_2$ .
- ✓ En la combustión se puede formar  $SO_2$  que es también altamente tóxico y corrosivo.
- ✓ Disminución del poder calorífico del gas.
- ✓ Promoción de la formación de hidratos.
- ✓ Cuando el gas se va a someter a procesos criogénicos es necesario remover el  $CO_2$  porque de lo contrario se solidifica.
- ✓ Los compuestos sulfurados (mercaptanos (RSR), sulfuros de carbonilo (SCO) y disulfuro de carbono) tienen olores bastante desagradables y tienden a concentrarse en los líquidos que se obtienen en las plantas de gas; estos compuestos se deben remover antes de que los compuestos se puedan usar.

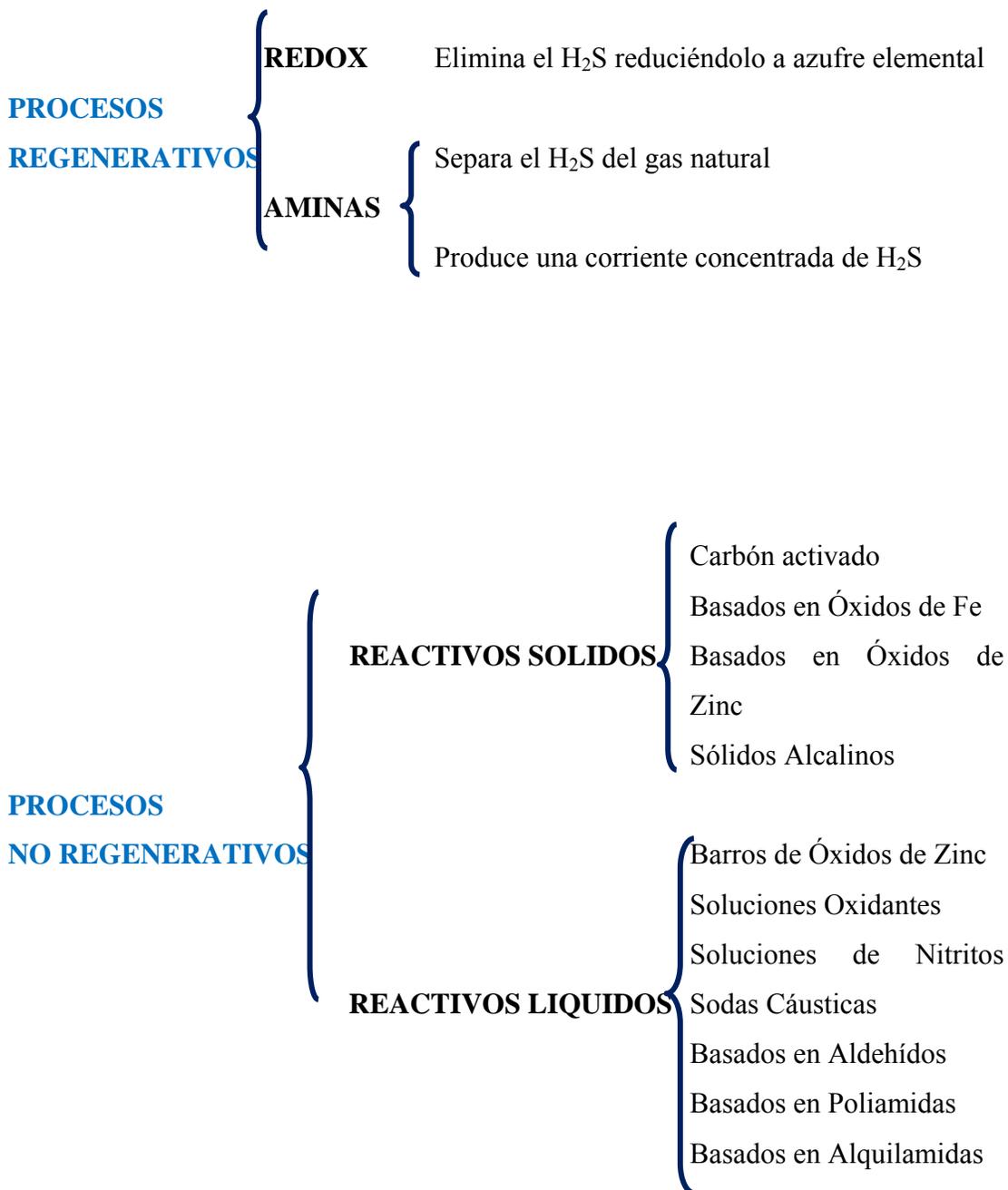
Un proceso de endulzamiento se puede decir, en general, que consta de cuatro etapas:

- **Endulzamiento.** Donde se le remueve por algún mecanismo de contacto el  $H_2S$  y el  $CO_2$  al gas. Esto se realiza en una unidad de endulzamiento y de ella sale el gas libre de estos contaminantes, o al menos con un contenido de estos igual o por debajo de los contenidos aceptables.
- **Regeneración.** En esta etapa la sustancia que removió los gases ácidos se somete a un proceso de separación donde se le remueve los gases ácidos con el fin de poderla reciclar para una nueva etapa de endulzamiento. Los gases que se deben separar son obviamente en primer lugar el  $H_2S$  y el  $CO_2$  pero también es posible que haya otros compuestos sulfurados como

mercaptanos (RSR), sulfuros de carbonilo (SCO) y disulfuro de carbono (CS<sub>2</sub>).

- **Recuperación del Azufre.** Como el H<sub>2</sub>S es un gas altamente tóxico y de difícil manejo, es preferible convertirlo a azufre elemental, esto se hace en la unidad recuperadora de azufre. Esta unidad no siempre se tiene en los procesos de endulzamiento pero cuando la cantidad de H<sub>2</sub>S es alta se hace necesaria. En la unidad recuperadora de azufre se transforma del 90 al 97% del H<sub>2</sub>S en azufre sólido o líquido. El objetivo fundamental de la unidad recuperadora de azufre es la transformación del H<sub>2</sub>S, aunque el azufre obtenido es de calidad aceptable, la mayoría de las veces, para comercializarlo.
- **Limpieza del gas de cola.** El gas que sale de la unidad recuperadora de azufre aún posee de un 3 a un 10% del H<sub>2</sub>S removido del gas natural y es necesario removerlo, dependiendo de la cantidad de H<sub>2</sub>S y las reglamentaciones ambientales y de seguridad. La unidad de limpieza del gas de cola continua la remoción del H<sub>2</sub>S bien sea transformándolo en azufre o enviándolo a la unidad recuperadora de azufre. El gas de cola al salir de la unidad de limpieza debe contener solo entre el 1 y 0.3% del H<sub>2</sub>S removido. La unidad de limpieza del gas de cola solo existirá si existe unidad recuperadora.
- **Incineración.** Aunque el gas que sale de la unidad de limpieza del gas de cola sólo posee entre el 1 y 0.3% del H<sub>2</sub>S removido, aun así no es recomendable descargarlo a la atmósfera y por eso se envía a una unidad de incineración donde mediante combustión el H<sub>2</sub>S es convertido en SO<sub>2</sub>, un gas que es menos contaminante que el H<sub>2</sub>S. Esta unidad debe estar en toda planta de endulzamiento.

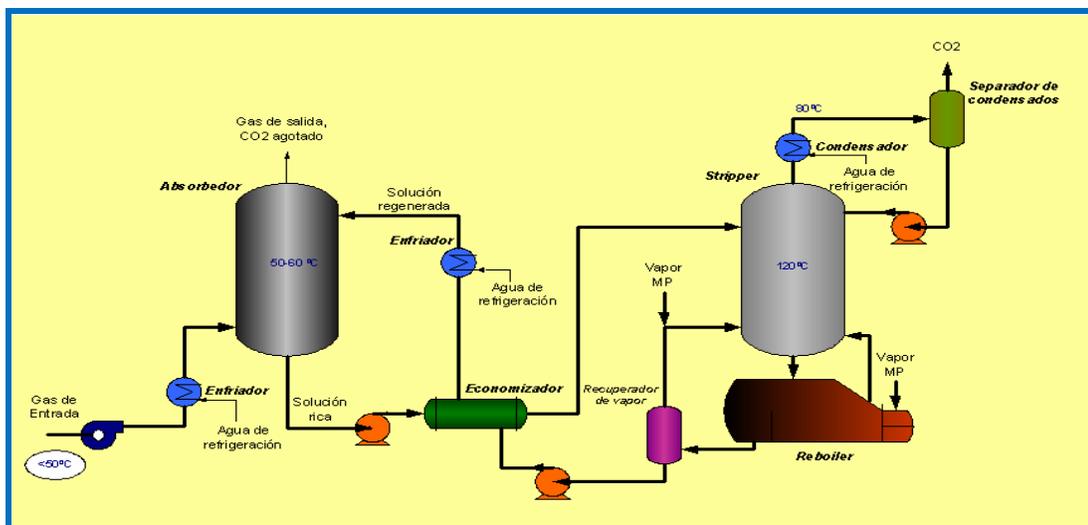
## 2.10 Opciones de tratamiento del gas natural



## 2.10.1 Procesos regenerativos

### 2.10.1.1 Proceso con Aminas

El proceso con aminas consiste en la absorción de  $H_2S$  (y/o  $CO_2$ ) en una corriente de aminas líquidas, y una regeneración de dichas aminas, por medio de un cambio de las condiciones de equilibrio. La absorción se produce en una torre de contacto con internos como platos o relleno, donde el gas entra por la parte inferior de la torre, circula a contracorriente de las aminas que absorben el contaminante, y sale por la parte superior. Las aminas salen de la torre por la parte inferior, concentradas en el contaminante, y circulan hacia el sistema de regeneración. Dicho sistema consiste en una torre destiladora de platos o relleno que funciona a baja presión, donde las aminas son calentadas en el fondo de la torre por un rehervidor, y los vapores del tope son enfriados en una aereoenfriador. De este modo los gases disueltos en las aminas son liberados, y salen por el tope de la columna de regeneración. El sistema se completa con las bombas de circulación de solución, intercambiadores de calor y aereoenfriadores, tanque de expansión para separar los hidrocarburos coabsorbidos, y filtros de partículas y de carbón para mantener la pureza de las aminas.



**Figura 2.17.- Esquema general del Proceso de Absorción Química para la captura de  $CO_2$  en gases de combustión (CTCP)**

Desde el punto de vista ambiental, un inconveniente importante de este sistema es que esta corriente de gas contaminante ( $\text{CO}_2$  y/o  $\text{H}_2\text{S}$ ) ha sido separada del gas natural, pero sigue existiendo como tal, concentrado en otra corriente gaseosa. El problema del  $\text{H}_2\text{S}$  no ha sido eliminado. Este efluente debe tratarse entonces en otro proceso que transforme el  $\text{H}_2\text{S}$  en azufre elemental, disulfuro de hierro u otra sustancia inocua.

Para extraer  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{CO}_2$  del gas natural tradicionalmente se han utilizado aminas primarias (MEA) y secundarias (DEA) ó (DGA). Durante los últimos veinticinco años se ha desarrollado el uso de solventes formulados basados en aminas terciarias (MDEA) para disminuir los consumos energéticos y reducir problemas de corrosión y degradación de los solventes. La MDEA tiene además la ventaja de tener mejor control sobre la extracción de  $\text{CO}_2$  que las aminas primarias y secundarias. A diferencia de estas, se puede formular su reactividad hacia ese compuesto y esto es conveniente ya que para cumplir con las especificaciones de inyección a gasoducto es necesario reducir el  $\text{H}_2\text{S}$  hasta niveles muy bajos, pero es aceptable dejar hasta el 2% de  $\text{CO}_2$ . Si el gas se utiliza en una turbina de gas en el yacimiento se puede dejar hasta 20% de  $\text{CO}_2$ . La MDEA formulada permite ajustar la absorción de  $\text{CO}_2$  al verdadero requerimiento del consumidor del gas ahorrando energía y costo de inversión.

#### **2.10.1.2 Proceso REDOX**

En el absorbedor de una planta REDOX se reduce directamente el  $\text{H}_2\text{S}$  del gas a azufre elemental. Las plantas de aminas, en cambio, separan el  $\text{H}_2\text{S}$  en el absorbedor y lo liberan inalterado por la cabeza del despojador. Para satisfacer requerimientos de protección ambiental requieren una planta adicional (Clauss) para transformar el  $\text{H}_2\text{S}$  en S elemental. La dupla Amina – Clauss es económica para grandes extracciones de azufre. Pero cuando la extracción es menor de 10 ton/día el proceso REDOX puede competir seriamente. Es utilizado también para tratar el efluente de la planta Clauss.

Las plantas REDOX necesitan supervisión continua y especializada de la operación para evitar los altos consumos de catalizador.

El proceso REDOX utiliza un ion soluble en agua capaz de tomar las cargas negativas del ion  $S^{2-}$  para formar  $S^0$  (Reducción del  $Fe^{3+}$ ) y a su vez puede transferir los electrones al oxígeno en el proceso de regeneración (Oxidación del  $Fe^{2+}$ ).

La reacción de reducción ocurre en el absorbedor:



La reacción de regeneración ocurre en el regenerador:



La suma de las dos reacciones es:



que es igual a la reacción Claus modificada.

Tanto el  $Fe^{2+}$  como el  $Fe^{3+}$  son inestables en soluciones acuosas y normalmente precipitan como  $Fe(OH)_3$  ó  $FeS$ . Para prevenir esta precipitación se agregan agentes quelantes que mantienen a los iones  $Fe^{3+}$  y  $Fe^{2+}$  en solución. La mezcla de iones hierro y agentes quelantes es el catalizador, provisto por el licenciataro del proceso.

### 2.10.2 Procesos no regenerativos

Las plantas basadas en esta tecnología son simples batería de reactores dispuestos en paralelo o serie, cargados con reactivos (“**secuestradores**”) sólidos o líquidos. El proceso no-regenerativo más antiguo utilizado por los productores de gas natural es el de “**esponja de hierro**”.

Estos procesos son utilizados para tratar gas contaminado con bajas concentraciones de  $H_2S$  que no requieren extracción de  $CO_2$ . A continuación se realiza una descripción de un reactivo líquido, uno sólido y el tradicional esponja de hierro.

#### **2.10.2.1 Reactivo líquido basado en Nitrito de Sodio**

Este reactivo consiste en una solución acuosa de nitrito de sodio. Esta sustancia reacciona con el  $H_2S$  cuando el gas se hace burbujear en la masa de líquido. La reacción produce partículas de azufre, que se acumulan en forma de barros, y sales de sodio y amonio que permanecen en la solución. La reacción es rápida, permitiendo altas relaciones de azufre removido/reactivo.

Los parámetros a controlar para mantener la reacción en condiciones óptimas son la temperatura y el pH de la solución.

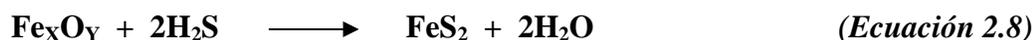
En presencia de  $CO_2$  y  $O_2$  (oxígeno), se pueden formar mediante reacciones paralelas gases tóxicos de amoníaco y óxido nítrico. Si hay hidrocarburos en forma líquida en la solución, se presentarán problemas de espuma, que son evitados manteniendo la solución a mayor temperatura que el gas de entrada.

La disposición final de azufre, normalmente en una suspensión en la solución del reactivo, es el principal problema de esta tecnología. Normalmente se acumula en tambores el producto final, para realizar su disposición final cuando la cantidad lo justifique. El reactivo agotado no es tóxico ni peligroso, pero el reactivo nuevo sí lo es. Por lo tanto, si el reactivo no ha sido completamente reaccionado en la operación, cosa que puede ocurrir si se interrumpe el proceso por taponamiento del distribuidor, es un residuo tóxico en algún grado. Por lo antedicho, se debe además tomar precauciones suficientes en la manipulación del reactivo nuevo, pues es muy tóxico.

### 2.10.2.2 Reactivo sólido basado en óxido de hierro

El reactivo es de tipo sólido. Consiste en una base inerte, conteniendo el reactivo de hierro propiamente dicho y otros productos químicos, y está conformado en forma de gránulos de granulometría 4 – 30 mesh.

El óxido de hierro está presente en el reactivo en varias formas, y reacciona selectivamente con el H<sub>2</sub>S y el etil y metil mercaptano formando disulfuro de hierro, según la reacción:



El rango de aplicación del reactivo sólido basado en óxido de hierro es muy amplio en todos los aspectos. No presenta limitaciones en cuanto al caudal de gas a tratar, la presión de operación, la concentración de H<sub>2</sub>S la cual puede variar desde algunas pocas ppmv hasta 100%, ni la cantidad de CO<sub>2</sub> presente en el gas. En cuanto a la temperatura, es de normal aplicación entre 0 y 90°C contando con la posibilidad de extender este rango previo análisis del caso.

La reacción es muy rápida si el gas se encuentra saturado en agua y a una temperatura de entre 20 y 50°C, siendo estas las condiciones fundamentales que se deben controlar y asegurar para que el proceso funcione según lo previsto. La presión no tiene efecto sobre la reacción, salvo que en el mismo recipiente, la presión es inversamente proporcional a la velocidad del gas, lo que sí afecta la reacción. El oxígeno tiene un efecto acelerador de la reacción, resultando en una mayor eficiencia. La presencia de CO<sub>2</sub> a alta presión tiene un efecto retardador de la reacción, resultando en una menor eficiencia. Los otros componentes gaseosos encontrados en el gas natural no tienen efectos sobre el proceso. Un factor a controlar son los contaminantes en fase sólida o líquida que trae el gas, lo que pueden disminuir la

eficiencia del lecho. La presencia de líquidos libres en la corriente de gas aumenta la pérdida de carga, y disminuye la superficie de contacto entre el gas y el reactivo.

Con respecto a la instalación requerida, esta es muy simple y se conforma de recipientes con instrumentación sencilla y sin requerimientos de automatización. Esto hace que estas sean de rápido y fácil montaje lo que convierte al proceso en una opción muy adecuada en casos en los cuales se requiere un tratamiento inmediato del gas. Además estas instalaciones pueden ser trasladadas fácilmente haciéndolo atractivo en aplicaciones temporarias y/o permanentes.

En cuanto a la operación, los sistemas presentan una gran estabilidad frente a las variaciones en las condiciones operativas y son muy predecibles en cuanto a la performance. Esto posibilita la verificación de diseños existentes para nuevas condiciones de proceso.

Por otro lado, el proceso requiere escasa atención por parte de operadores y virtualmente no requiere de servicios auxiliares tales como aire y/o energía eléctrica. La carga y descarga del producto es un proceso sencillo el cual puede ser llevado a cabo sin inconvenientes debido a que el producto no presenta características de toxicidad que dificulten el manipuleo.

La disposición final es una de las ventajas más notorias que presenta el reactivo sólido no regenerable ya que este puede ser dispuesto simplemente sobre el erren sin recibir ningún tratamiento posterior, esto siempre debe ser realizado atendiendo a las regulaciones locales. Cabe aclarar que existen otras formas de disposiciones finales tal como se explica en la sección siguiente.

### 2.10.2.3 Esponja de hierro

La esponja de hierro consiste en una base orgánica de madera en forma de astillas o virutas, impregnadas del reactivo, óxidos de hierro hidratado.

Reacciona con ácido sulfhídrico y mercaptanos, formando sulfuros de hierro, agua y azufre.



La reacción solo es posible en presencia de agua, por lo que el producto debe estar siempre húmedo, a riesgo de perder su reactividad en forma permanente si se seca. La temperatura debe ser moderada, para permitir una eficiencia aceptable. El medio debe mantenerse alcalino, lo que puede requerir aditivos para corrección de pH. La velocidad debe estar entre límites definidos. Una baja velocidad puede disminuir la turbulencia del flujo de gas hasta causar un pobre contacto entre el mismo y el reactivo, con pérdida de eficiencia. Una velocidad elevada aumentará la pérdida de carga, y reducirá el tiempo de contacto por debajo del mínimo necesario para la reacción de todo el caudal de gas. Finalmente, la presión debe estar por encima de 1,4 kgf/cm<sup>2</sup> (manométrica), pues por debajo de este límite la reacción se vuelve muy poco predecible.

Los principales problemas del proceso con esponja de hierro, que han llevado a desarrollar productos alternativos, son operativos: el proceso es en algunos casos difíciles de predecir, y la remoción y disposición del producto usado es complicada y potencialmente peligrosa, por lo que se debe adoptar precauciones especiales.

El producto, en operación, se compacta bastante. Ello, sumado a que las astillas de madera se "suedan" entre sí con los subproductos de la reacción (sulfuro de hierro y azufre), hace que al final del ciclo de operación, la masa de producto dentro del

recipiente forme un sólido aglomerado que exige mucho trabajo para desmenuzar y remover.

El azufre extraído del gas se transforma principalmente en FeS (sulfuro de hierro). Este compuesto se oxida muy rápidamente en condiciones atmosféricas, volviendo el hierro a óxido, y el azufre como azufre elemental. Esta reacción es exotérmica. Cuando se remueve el producto del recipiente, se debe retardar el contacto del mismo con el aire, pues la reacción de oxidación produce un aumento de temperatura tal, que puede producir quemaduras o la combustión espontánea del material, que es de madera y puede estar impregnada con hidrocarburos líquidos.

La forma de evitar esto es inundar el recipiente con agua, y luego remover el material rociando con agua permanentemente. Cuando el material se ha sacado de la torre, se lo debe esparcir en suelo inerte, y se lo debe remover a intervalos regulares, sin dejar que se seque.

### **2.11 Utilización de un reactivo sólido para la eliminación de H<sub>2</sub>S de gases**

Una completa descripción de la operación de desulfurización de gas utilizando un reactivo sólido no regenerable en la cual se muestran las ventajas comparativas que este presenta frente a otros procesos y las características tanto de las instalaciones requeridas, como de la operación y la disposición final del reactivo una vez reaccionado confirman al reactivo sólido como una de las alternativas que se impone fuertemente frente a las otras disponibles en el mercado a la hora de la purificación de gases del contaminante H<sub>2</sub>S.

Para la operación descrita la cantidad de H<sub>2</sub>S a remover por día es moderada, es decir de menos de 500 Kg/día de H<sub>2</sub>S.

### **2.11.1 Selección de la tecnología**

Si bien el criterio de la tecnología basado en la cantidad de H<sub>2</sub>S a remover por día considera principalmente la inversión inicial y el costo operativo del proceso existen otros factores que deben tenerse en cuenta a la hora de la selección tales como, la simplicidad para la operación, la sencillez y el tamaño de las instalaciones y los equipamientos requeridos, la continuidad y la certeza de las condiciones de proceso y de los niveles de contaminante, la urgencia con la cual se requiere solucionar el problema de contaminación así como también las características ambientales del producto tanto en su forma reaccionada como sin reaccionar y los cuidados que deberán tener en cuenta las personas que manipulen el producto.

#### **2.11.1.1 Tecnología Regenerativa vs. No regenerativa**

En aplicaciones donde los Kg. de H<sub>2</sub>S a remover por día de una corriente de gas son moderados tanto la simplicidad operativa como el bajo costo de inversión inicial de las sistemas de eliminación de H<sub>2</sub>S mediante un reactivo solido no regenerable compensan ampliamente el mayor costo operativo por Kg. de removido que estos presentan frente a los procesos regenerativos. Además, un reactivo solido puede ser utilizado para eliminar H<sub>2</sub>S hasta cualquier nivel de H<sub>2</sub>S requerido a la salida ya que concentraciones cercanas a las cero pppv son alcanzadas normalmente en estas operaciones.

#### **2.11.1.2 Tecnología de Reactivos Sólidos vs. Otros proceso No Regenerativa**

Un reactivo sólido con mejoras desarrolladas recientemente permiten operar en una diversidad muy amplia de condiciones de operación. En comparación con los reactivos sólidos antiguamente utilizados, tales como la esponja de hierro un reactivo sólido moderno es simple, confiable, de gran flexibilidad operativa, de fácil manejo para los operadores y ambientalmente seguro.

En comparación con los reactivos no regenerables líquidos no presentan durante la operación problemas de taponamiento en las instalaciones como tampoco posibilidad de formación de espuma y su posterior arrate aguas debajo de la instalación. Tampoco presentan problemas en la manipulación del producto sin reaccionar ni problemas de disposición final del reactivo reaccionado el cual constituye la principal desventaja de los reactivos líquidos.

## **2.11.2 Operación:**

### **2.11.2.1 Descripción de las instalaciones**

El sistema consta de uno o varios recipientes con sus cañerías, válvulas de operación y algunos equipos complementarios necesarios para la operación. La función de los recipientes es simplemente ofrecer el medio para la contención del reactivo a través del cual se hará circular el gas.

La instrumentación de los recipientes es muy simple constando apenas de indicadores de temperatura, presión y presión diferencial a través de los lechos de reactivo. En algunos casos con más de un recipiente la instalación de indicadores de caudal podría ser necesaria.

De lo anterior se desprende que ningún tipo de automatización es requerida con relación a la instrumentación.

### **2.11.2.2 Carga del reactivo**

Sobre los perfiles que soportan el lecho, se instala una chapa perforada, y dos mallas de acero inoxidable de 4 y 40 mesh. Estos tres elementos van simplemente apoyados, y a tope con las paredes del recipiente. La tolerancia en el diámetro no es crítica.

Sobre las mallas, va un filtro de espuma de poliuretano, que consiste solamente en un redondo de espuma de 6 pulgadas de espesor, con una sobremedida en el diámetro de 2 pulgadas, para realizar el ajuste con las paredes.

Una vez verificada la correcta instalación de las mallas y el filtro, se debe cerrar la boca de hombre inferior.

Las bolsas que contienen el producto, de 2000 lb (900 kg) de capacidad, tienen ojales para su izaje con grúa y una manga inferior para la salida. Las bolsas son, lo suficientemente resistentes como para soportar el manipuleo durante el transporte. Una vez en el yacimiento, las bolsas se pueden mantener en stock indefinidamente a la intemperie, con sólo depositarlas sobre los pallets utilizados para el transporte y cubrirlas con un plástico resistente a la radiación UV del sol, que evite la degradación de las bolsas y la lluvia directa.

Para cargar el producto en el recipiente se necesita una grúa con capacidad para levantar 900 kg (aunque con una grúa de mas capacidad, se pueden levantar varias, lo que hace la carga más rápida), y dos o tres ayudantes de campo. El producto se carga por la boca superior. Dos operarios parados sobre la plataforma de carga, deben mantenerse al costado de la bolsa que sostiene la grúa, y dirigir la manga de descarga por la boca de hombre. El producto cae libremente hasta el fondo del recipiente. No es necesario compactar el producto ni aplanar el cono de material a alturas intermedias. El cono sí deberá aplanarse una vez terminada la carga, sobre todo en recipientes de gran diámetro para evitar la creación de caminos preferenciales para el gas. La carga se hace por peso y siempre se diseña el recipiente para una cantidad entera de bolsas. Es recomendable hacer un doble conteo de las bolsas vacías, para asegurar la cantidad de producto cargado en el recipiente.

### 2.11.2.3 Puesta en Marcha

Una vez cerrada la boca de hombre superior, y todas las válvulas de drenaje, venteo, y toma de muestras, se presuriza el recipiente y se hace la comprobación de pérdidas. Luego se debe purgar el recipiente del aire que contiene, lo que se logra presurizando y despresurizando el recipiente dos o tres veces, enviando el gas a antorcha. Es preferible que el gas de purga no contenga  $H_2S$ , si las condiciones de temperatura y saturación de agua no son las de operación.

En caso de que la carga haya sido efectuada con temperaturas bajo cero, y sobre todo si el producto ha sido almacenado por algún tiempo a temperaturas de congelación, se lo debe descongelar. De lo contrario no se producirá la reacción, que como sabemos, necesita de agua en estado vapor y un rango de temperaturas adecuado. Como el producto es bastante poco conductor del calor, la mejor manera de descongelar todo el lecho es con gas dulce.

Haciendo pasar en pequeño caudal de gas dulce (al tiempo que se purga el recipiente) y observando la temperatura de salida hasta que llegue hasta  $\sim 5^\circ C$ , se logra la descongelación.

Una vez purgado y presurizado el recipiente, se debe verificar la temperatura del gas de entrada, que simplemente debe estar dentro de los límites de diseño.

El recipiente puede ponerse ahora en operación. La remoción de  $H_2S$  es inmediata. Cuando se trate de un gas que no está saturado de agua, se debe verificar la operación del sistema de inyección de agua.

La forma más práctica y confiable de realizar las mediciones de contenido de agua y concentración de  $H_2S$ , es con tubos de medición colorimétricos y una bomba manual tipo jeringa.

Sólo resta por comprobar, una vez estabilizados el caudal y temperatura de entrada y salida el contenido de agua y  $H_2S$  de entrada y salida, las temperaturas del gas, y la caída de presión.

#### **2.11.2.4 Operación**

La operación es sumamente sencilla, y requiere una supervisión semanal básica y una completa mensual.

- ✓ ***Sistema de inyección de agua:*** Se debe cuidar la saturación en agua del gas de entrada a la torre. Esto se logra agregando agua en exceso en el separado de entrada al sistema mediante un pico de inyección. Se retira el excedente por el fondo de la misma, asegurando de este modo que a cualquier presión o temperatura siempre se cumpla la condición de saturación, sin enviar líquidos libres al lecho. La operación del sistema de inyección de agua está entre las comprobaciones a efectuar.
- ✓ ***Medición de contenido de agua:*** No es posible predecir con exactitud el contenido de agua de saturación en un gas que tiene variaciones de composición, temperatura, presión, y  $H_2S$ , y usando tablas no siempre exactas. Para asegurar la correcta operación del lecho, se debe verificar solamente que el contenido de agua de entrada esté cercano al calculado, y sobre todo que sea mayor al de salida.
- ✓ ***Medición de  $H_2S$ :*** La medición de la concentración del contaminante en la entrada, debe hacerse periódicamente para verificar que cumple con lo previsto. Al aumentar la concentración de  $H_2S$ , la vida del lecho se acorta proporcionalmente, lo que debe saberse por anticipado para prever el recambio de lecho. Se han observado picos de  $H_2S$  de hasta 3 veces el normal, sin observarse  $H_2S$  a la salida. De todos modos, un pico de contaminante de uno o dos órdenes mayores al de diseño podría producir  $H_2S$  en la salida por encima de la especificación.

La medición de H<sub>2</sub>S de salida sirve para verificar la correcta operación del sistema, y para prever el recambio. Normalmente el contenido de H<sub>2</sub>S en la salida ha sido inferior a 0.1 ppmv durante casi todo el tiempo de operación. Llegando al final de la operación, el contenido de H<sub>2</sub>S comienza a subir lentamente, hasta llegar a 2 ppmv, que suele ser el límite aceptable. Este aumento en la concentración de H<sub>2</sub>S de salida toma siempre varios días, dando tiempo a preparar los elementos para el recambio de producto.

Ello ha determinado que la frecuencia de las mediciones de H<sub>2</sub>S de salida debe aumentarse en el último tercio del tiempo calculado de operación, midiéndose diariamente una vez que comienza a subir. La medición de H<sub>2</sub>S a lo largo del lecho no ha probado ser útil, salvo en caso de cambio de las condiciones operativas. La mayoría de las veces basta con medir a la entrada y a la salida.

- ✓ **Temperatura:** La lectura de temperatura debe hacerse con una frecuencia baja, pues el gas normalmente no experimenta temperaturas bajas.
- ✓ **Presión de operación:** Esta lectura se hace para verificar que la velocidad del gas no sea excesivamente alta por baja presión. A pesar de que normalmente se registran picos de baja presión, no suelen observarse problemas.
- ✓ **Caída de presión:** Esta lectura debe hacerse con una baja frecuencia, pues el caudal de la planta está medido. La caída de presión, por lo tanto, se anota y relaciona con el caudal procesado, para detectar cualquier problema de ensuciamiento del lecho, cosa que no se ha producido. La pérdida de carga en el lecho suele ser de 0.1 a 0.2 kgf/cm<sup>2</sup>, y no va aumentando a lo largo del tiempo de operación.

- ✓ **Caudal de gas:** La medición de caudal es muy útil, aunque no es obligatoria para el funcionamiento del sistema de desulfurización en sí. El total del volumen procesado, junto con las mediciones de H<sub>2</sub>S, dan con bastante exactitud la vida restante del lecho, y la fecha probable del recambio. Por supuesto, esto es útil sólo en caso que el caudal y la concentración de H<sub>2</sub>S sean variables.
- ✓ **Drenaje del recipiente:** debe hacerse periódicamente, para evacuar el agua acumulada en el fondo. La cantidad de agua no es importante y es un indicador de un eficiente funcionamiento el lecho. Demasiada agua indica arrastre de agua libre, y ausencia de agua indica subsaturación el gas.

En resumen, las mediciones de agua y H<sub>2</sub>S son las más importantes, y la frecuencia de toma de lecturas de los demás indicadores depende de la frecuencia de medición de agua y H<sub>2</sub>S. El reactivo soporta fácilmente variaciones en el caudal y en la concentración de H<sub>2</sub>S, siendo la variable de ajuste el tiempo de vida útil de la carga.

#### **2.11.2.5 Parada del Sistema**

Una vez decidido el recambio del producto, se debe aislar el recipiente cerrando entrada y salida. Luego se lo debe despresurizar por la salida. Se debe purgar el recipiente del gas con H<sub>2</sub>S, por la toxicidad del mismo contaminante, y por los problemas que ocasionan los hidrocarburos (asfixia, mezcla explosiva). Conviene hacer la purga llenando de agua el recipiente por el drenaje. Luego se debe abrir la boca de hombre superior.

#### **2.11.2.6 Descarga del producto usado**

Para la descarga se usa un camión volcador o tolva para recibir y transportar el producto, una bomba de agua de buen caudal y presión, un pico de manguera de

bomberos o simplemente una reducción a 1/4" para crear un chorro potente, y 4 ayudantes de campo con palas.

Para recibir el producto usado, se ubica la tolva debajo de la boca de hombre inferior, y se abre la misma. El producto sale libremente al principio, y luego se lo debe ayudar con las palas, hasta remover la totalidad. Cuando el producto no ha salido libremente, se lo ha removido con el chorro de agua de la bomba desde abajo, introduciendo la reducción en el recipiente por medio de un codo. Esto se ha hecho así pues si cayera una cantidad grande de producto al mismo tiempo, podría dañar los brazos del operario que sostiene la manguera. Al final de la extracción del producto, se limpian las paredes desde arriba, con el chorro de agua. Normalmente una bomba de 15 kgf/cm<sup>2</sup> de presión de descarga y 10 m<sup>3</sup>/h de caudal. Con mayores presiones o caudales, se podría reducir el tiempo de descarga.

El producto esta empapado en agua, y conviene dejar escurrir el agua sobrante, que puede colectarse y enviarse al tanque de drenajes o a un pozo. Esta agua contiene finos del producto, que al igual que el resto del mismo, puede quedar en el suelo sin causar efectos de ningún tipo.

#### **2.11.2.7 Disposición final del producto usado**

La disposición del producto agotado puede hacerse directamente sobre el terreno. No se observa reactividad al aire. Se lo dispone en forma de pilas, directamente como se lo descarga de la tolva, o esparciéndolo y mezclándolo con el terreno. En este último caso se observó después de algún tiempo, vegetación nueva creciendo en el terreno mezclado.

Se han recibido reportes de usuarios del producto, donde se mencionan usos del producto usado tales como bacheo de caminos, o como material de carga para fabricación de ladrillos.

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1 Técnicas de investigación**

Los métodos o técnicas de investigación se emplean mayormente para obtener los datos. Entre estos se tienen: el método directo que consiste en la observación directa y recolección de datos en la fuente primaria y el método indirecto que se trata de la recopilación de datos brindados por terceros

En función de cumplir con los objetivos establecidos en el estudio, se aplicaron las siguientes técnicas:

##### **3.1.1 La observación Directa:**

Que permitió obtener la información inmediata de los equipos que están siendo afectados por la presencia de azufre elemental. A través de esta técnica se obtuvieron los datos necesarios para realizar los estudios correspondientes a la investigación, así como también, conocer las condiciones en las que se encuentra el Sistema Anaco – Jose – Puerto la Cruz

##### **3.1.2 Consulta bibliográfica:**

La documentación se empleó para recolectar información empírica y teórica referente al problema en estudio

##### **3.1.3 Entrevistas:**

Se aplicaron entrevistas estructuradas a los ingenieros de procesos y al personal de la Superintendencia de Operaciones del Sistema Anaco Jose, con el propósito de obtener mayor información relacionada con las actividades que competen al desarrollo de este trabajo.

### **3.2 Instrumentos de recolección de datos**

Son recursos indispensables para la investigación y su fin es recopilar información sobre el objeto de estudio.

En el presente trabajo se contó con herramientas tales como:

- ✓ Referencias bibliografías
- ✓ Cámaras digitales
- ✓ Internet

### **3.3 Técnicas de análisis de datos**

Una vez aplicados los instrumentos y técnicas de recolección de datos, la información que se recabó en el proceso fue analizada exhaustivamente, para una mejor comprensión de la misma.

### **3.4 Fases de la investigación**

A fin de cumplir con los objetivos propuestos el proyecto se realizó en etapas que se describen a continuación:

#### **3.4.1 Revisión Bibliográfica:**

En este nivel se procedió a recopilar toda la información que sustentó el proyecto, mediante la revisión de textos, manuales y cualquier otro tipo de material impreso de utilidad para la documentación del tema de estudio.

#### **3.4.2 Actualización de datos:**

Se visitaron las oficinas de PDVSA GAS en Guaraguao, con la finalidad de conocer cuál fue el resultado de la evaluación de los sólidos encontrados en los pilotos de los reguladores 310-32 instalados en el sistema de transporte Anaco – Jose – Puerto La Cruz.

**3.4.3 Emisión de las Conclusiones y Recomendaciones:**

Obtenidas a través del estudio realizado

**3.4.4 Elaboración del Informe final:**

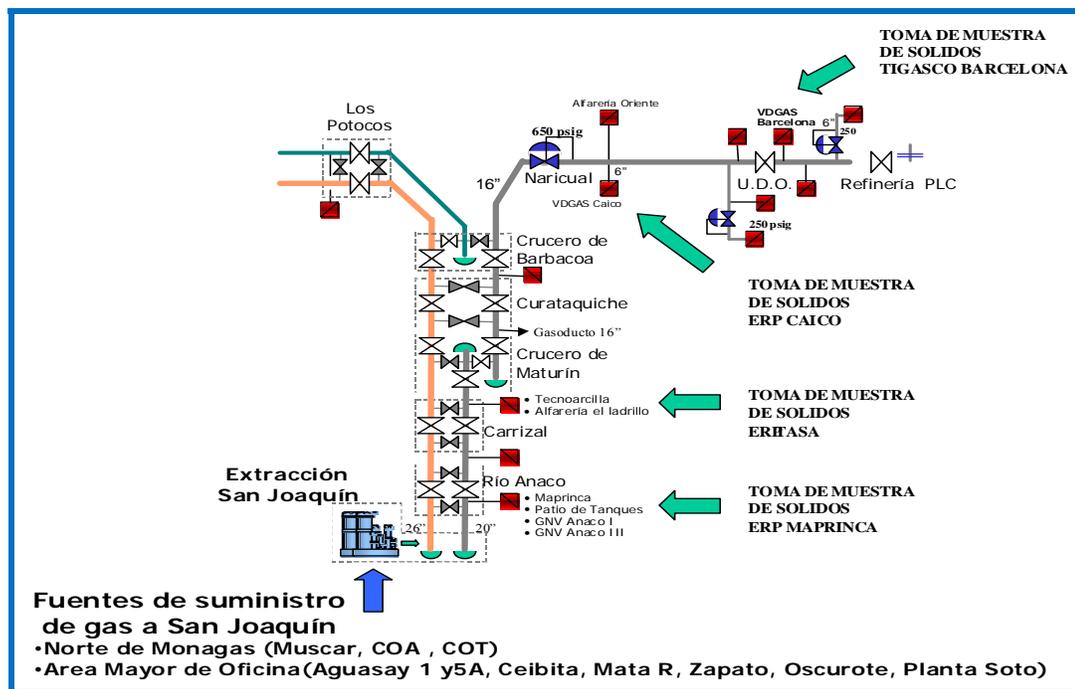
Por último se redactó el trabajo de grado cumpliendo con las reglas asociadas a su desarrollo, cuya reacción se hizo de manera ordenada y clara basándose en los objetivos planteados inicialmente

## CAPÍTULO IV

### DESARROLLO DEL TRABAJO

#### 3.1 Identificación de la fuente de azufre elemental en el sistema de transporte y distribución en el tramo Anaco – Jose/Puerto la Cruz.

Los días 20 y 21 de marzo del 2001 se llevaron a cabo conjuntamente con personal de mantenimiento del Sistema Anaco Jose, las inspecciones internas de los pilotos de los reguladores 310-32 y filtros Fisher 254 de las estaciones RP (Regulación Primaria) MAPRINCA, TASA y CAICO ubicadas en el sistema Anaco – José (*ver figura 3.1*). Estas inspecciones se realizaron porque personal del área operacional observó obstrucción del orificio de entrada del piloto en el Regulador Fisher 310-12, por partículas pequeñas de polvo de color amarillento.



**Figura 3.1.- Sistema de Transporte Anaco – Jose – Puerto la Cruz**

Las instalaciones donde se tomaron muestras de sólidos en el piloto del regulador para ser analizadas fueron:

- **ERP (Estación de Regulación Primaria) Maprinca:**

Ubicada en la Estación Río Anaco, en la progresiva 12+950 del Sistema Anaco Jose, cuyo último mantenimiento se realizó el día 11 Febrero 2001. Entre sus características operacionales se tienen:

- Presión de entrada: 850 psig
- Presión regulada: 180 psig
- Regulador: marca Fisher, modelo 310-32
- Clientes asociados al ramal Maprinca: GNV Anaco II, Anaco III, Patio de Tanques Anaco y Maprinca.

Cabe resaltar que durante la inspección, el piloto no fue intervenido ya que el reemplazo y limpieza de sus partes internas se hizo un mes atrás, así como también el reemplazo del filtro 254 por el filtro marca Welker modelo F4. Por tanto solo se inspeccionó internamente el filtro 254 desincorporado y se retiró el elemento filtrante pues presentaba un punto de sólidos de color amarillo, para su análisis (*ver figura 3.2*).



**Figura 3.2.- Elemento filtrante 254 - RP Maprinca**

- **ERP Tasa (Estación de Regulación Primaria Tecnoarcillas S.A.):**

Ubicada en la progresiva 43+107 del Sistema Anaco Jose, cuyo último mantenimiento se realizó en marzo del 2000. Sus características operacionales son:

- Presión de entrada: 800 psig
- Presión regulada: 200 psig
- Regulador: marca Fisher, modelo 310-32
- Clientes asociados: Tecnoarcillas y Alfarería el Ladrillo

Esta inspección coincidió con el mantenimiento tipo C de la estación. El piloto estaba parcialmente tapado a nivel del orificio de entradas, se tomó muestra del tapón de sólido de color amarillo para análisis (*ver figura 3.3*). Todas las partes internas estaban contaminadas con sólidos de color amarillo y los diafragmas estaban deformados. El elemento filtrante estaba libre de sólidos de color amarillo.

Luego del reemplazo de las partes blandas del piloto y limpieza interna se realizó la prueba de hermeticidad del regulador resultando satisfactoria.



**Figura 3.3.- Tapón de sólido – RP Tasa**

- **ERP Caico:**

Ubicada en la progresiva 36+730 del gasoducto de 16" Crucero de Maturín – Refinería, su última fecha de mantenimiento fue en marzo del 2000. Sus características operacionales son:

- Presión de entrada 610 psig.
- Presión regulada 230 psig
- Regulador: marca Fisher, modelo 310-32
- Clientes asociados: VDGAS Caico y Alfarería Oriente

Esta inspección coincidió con el mantenimiento tipo C de la estación. Todas las partes internas del piloto estaban contaminadas con sólidos de color amarillo. La pieza que se observa en la *figura 3.4*, se reemplazo y envió con el sólido adherido para análisis.

El elemento filtrante estaba libre de sólidos de color amarillo. Luego del reemplazo de las partes blandas del piloto y limpieza interna se realizó la prueba de hermeticidad del regulador resultando no satisfactoria.



**Figura 3.4.- Pieza del regulador contaminada con sólido amarillo - RP Caico**

- ***EMR Tigasco Barcelona (Estación de Medición y Regulación:***

Ubicada en el sistema de distribución Puerto La Cruz, cuyo último mantenimiento se realizó en marzo del 2001. Sus características operacionales son:

- Presión de entrada 250 psig.
- Presión regulada 90 psig
- Regulador: marca Fisher, modelo 310-32

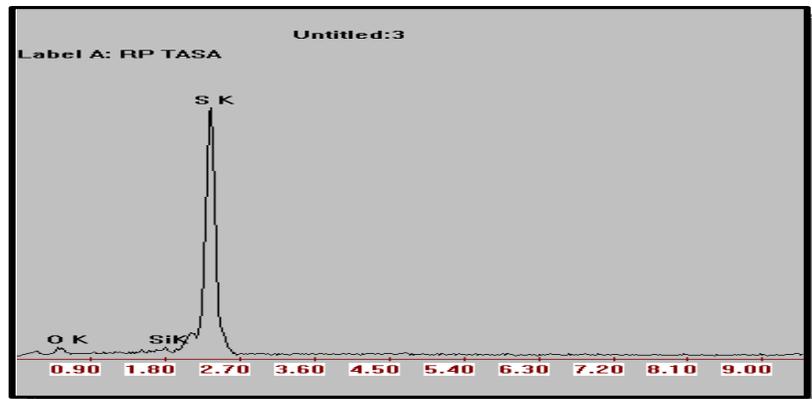
Se incorporó al análisis una muestra de sólidos correspondiente a la EMR Tigasco Barcelona del sistema de Distribución Puerto La Cruz (*ver figura 3.5*). La muestra fue retirada del cuerpo del regulador 310-32 por personal de mantenimiento durante la ejecución del mantenimiento tipo C, realizado en el mes de marzo, el regulador fue intervenido debido a que no paso la prueba de hermeticidad. Se encontró gran cantidad de sólidos en el cuerpo del regulador y el asiento desgastado.



***Figura 3.5.- Asiento de regulador 310-32 EMR Tigasco Barcelona***

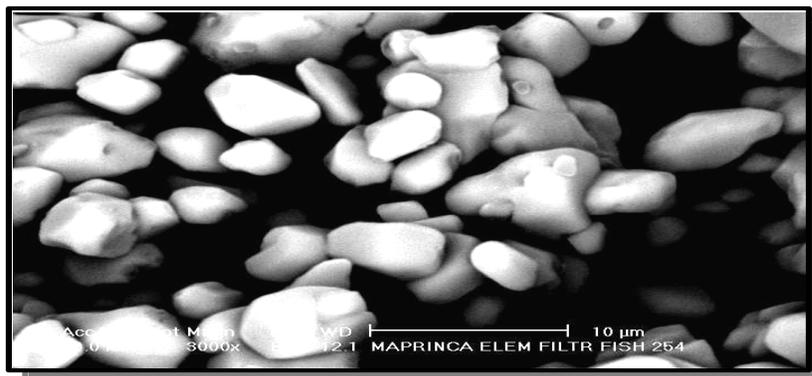
### 3.1.1 Determinación de la granulometría y naturaleza de los sólidos.

El resultado de los análisis de laboratorio realizado por Intevep indicó que todas las muestras de sólidos evaluadas están compuestas de azufre elemental, tal como se observa en los espectros de Difracción de rayos X. (*Figura 3.5*)



**Figura 3.5.- Espectro EDX Azufre**

El tamaño y la forma de los cristales de azufre son variables, sin embargo se observaron cristales con caras bien desarrolladas y cristales de hasta 2 micras aproximadamente, lo cual se obtuvo a través del análisis a la microfotografía realizada a los sólidos (*ver figura 3.6*). Esta información es fundamental para determinar el filtro requerido.



**Figura 3.6.- Microfotografía sólidos Maprinca**

### 3.1.2 Análisis de sólidos anteriormente realizados en los sistemas de transporte y distribución.

A fin de determinar si la presencia del azufre elemental es una condición exclusiva del sistema de transporte Anaco Jose se revisaron los análisis de sólidos asociados a estudios de causa raíz de falla realizada durante el año 2000 por el Dpto. de Ingeniería de Mantenimiento.

Como resultado de esta revisión también se confirmó la presencia de azufre elemental en las muestras de sólidos tomadas en los sistemas de transporte Anaco Puerto Ordaz y sistema de Distribución Anaco Barquisimeto, tal y como se muestra en cuadros anexos.

**Tabla 3.1.- Muestras Distribución Centro y Centro Occ.**

MUESTRA DISTRIBUCION CENTRO Y CENTRO OCC.	COMPOSICION QUIMICA	FASES CRISTALINAS
LIBAVEN	Mayoritarios: Fe Minoritarios: Al, Si, S	FeCO <sub>3</sub> (Siderita) SiO <sub>2</sub> (Cuarzo)
RENSOL	Mayoritarios: Fe Minoritarios: Al, Si, S	FeCO <sub>3</sub> (Siderita)
SISA MANPA	Mayoritarios: C, Fe, S Minoritarios: Al, Si	-
CONACA	Mayoritarios: C, Fe, S, Al, Si Minoritarios: K, Ca, Mg	-

**Tabla 3.2.- Muestras Transporte Anaco – Pto. Ordaz.**

MUESTRA TRANSPORTE ANACO PTO. ORDAZ	COMPOSICION QUIMICA	FASES CRISTALINAS
SOTO	Mayoritarios: Fe, S, Al, Si Minoritarios: K	FeCO <sub>3</sub> (Siderita) SiO <sub>2</sub> (Cuarzo) Fe <sub>9</sub> S <sub>11</sub> S (Azufre)
GUICO	Mayoritarios: Fe, S, Si Minoritarios: Al	S (Azufre) SiO <sub>2</sub> (Cuarzo) FeCO <sub>3</sub> (Siderita)
DACION	Mayoritarios: C, Fe, S, Si Minoritarios: Al	-

Cabe destacar que durante la realización de este estudio se visitó la planta de Extracción San Joaquín con el fin de conversar con los operadores sobre la presencia del azufre en el gas que procesan; ellos manifestaron haber visto sólido de color amarillo (en conectores de tubing donde existe pequeñas filtraciones), sin embargo no han realizado ningún estudio que indique su naturaleza, cantidad, fuente o efecto corrosivo. Dentro de la planta no existen sistemas de filtración con la capacidad de eliminar partículas sólidas de 2 micrones, los filtros de polvo a la salida de los tamices moleculares eliminan partículas a partir de 20 micrones.

### 3.1.2.1 Distribución de sólidos.

Un aspecto considerado durante la realización de este estudio fue la determinación de las condiciones operacionales que propician la distribución y acumulación de sólidos en la línea; esto con el fin de orientar acciones específicas que eviten la afectación de los equipos que manejen corrientes de gas con mayor cantidad de sólidos.

### 3.1.2.2 Velocidad de flujo.

La velocidad del flujo de gas puede influir en la dirección y distribución de los sólidos en la línea ya que interviene en las fuerzas centrífuga e inercia que actúan en la bifurcación del caudal gasoducto-ramal. Se realizaron los cálculos de velocidad para verificar en la práctica el comportamiento teórico. De acuerdo a esto tenemos:

**Tabla 3.3.- Velocidades en las Regulaciones (pies/seg)**

ERP	Aguas Arriba	Aguas Abajo
Maprinca	0,35	1,34
Caico	7,13	18,3
Tasa	0,27	0,29

Aunque se encontraron sólidos en los tres reguladores, la frecuencia mayor de falla de Maprinca indica que maneja mayor cantidad que las otras dos. De acuerdo a este planteamiento la diferencia de velocidad de flujo aguas arriba- aguas abajo puede influir pero no es determinante, porque:

La velocidad en Maprinca aguas abajo es 3,8 veces mayor que aguas arriba.

La velocidad en Caico aguas abajo es 2,6 veces mayor que aguas arriba

La velocidad en Tasa aguas abajo es 1,07 veces mayor que aguas arriba

En cuanto a la velocidad de flujo de gas en el piloto del regulador tenemos que es prácticamente estático.

### **3.1.2.3 Configuración.**

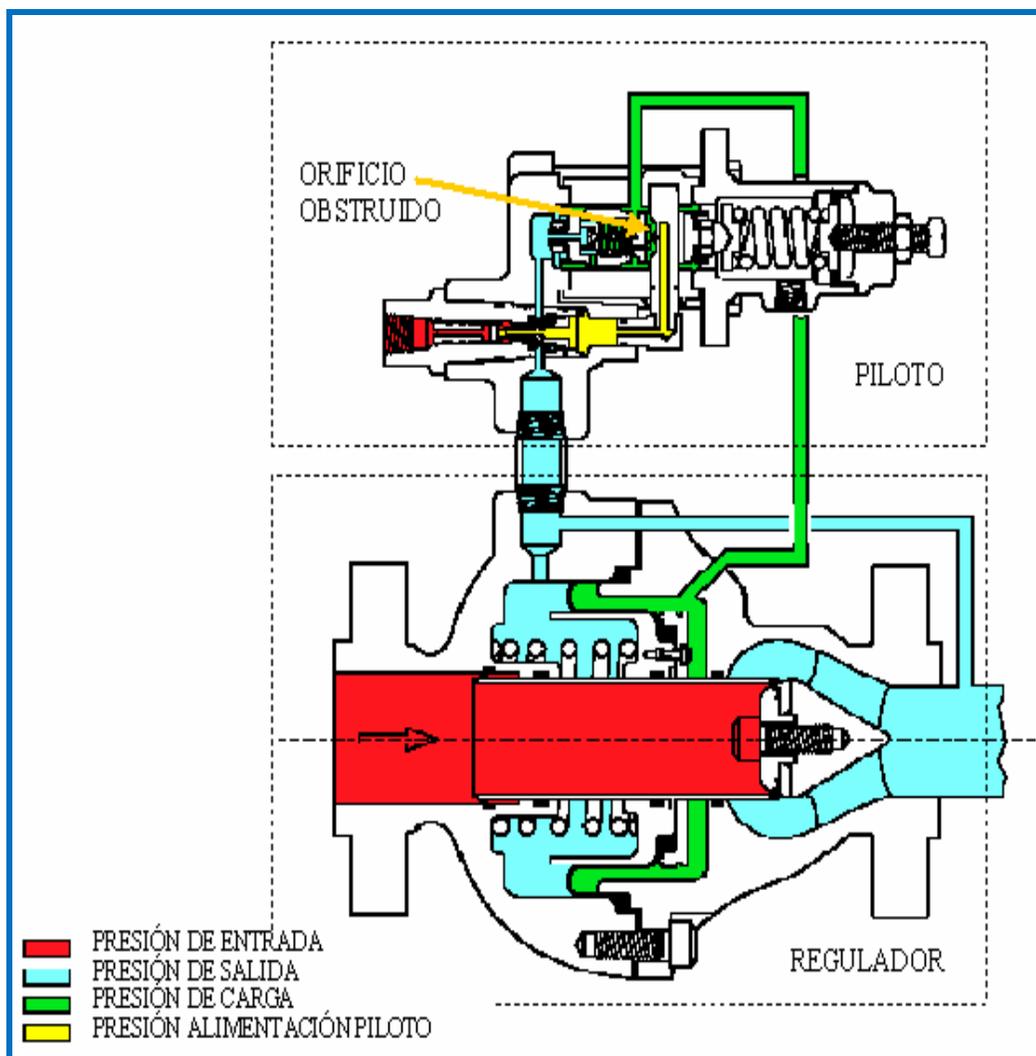
Accesorios tales como codos o bridas ciegas, propician la acumulación de sólidos en su interior por efecto de cambio de flujo y velocidad del gas. Si la toma de gas supply está muy próxima a alguno de estos accesorios, puede suceder que los mismos entren en mayor cantidad al piloto. Esta situación se observó en las instalaciones inspeccionadas.

## **3.2 Estudio de el principio de operación de los pilotos de reguladores FISHER 310-32 instalados en el sistema Anaco Jose/ Pto. la Cruz.**

La función del piloto es mejorar la velocidad de respuesta del regulador ante cambios en la presión de salida o flujo. En el piloto se realiza el ajuste de la presión de salida a través del resorte de control. El piloto actúa por equilibrio de fuerzas contrapuestas (resorte vs. presión de salida) y proporciona al regulador la presión de carga requerida. La *Figura 3.7*, ilustra esquemáticamente la operación de un Regulador pilotado tipo 310-32 marca Fisher.

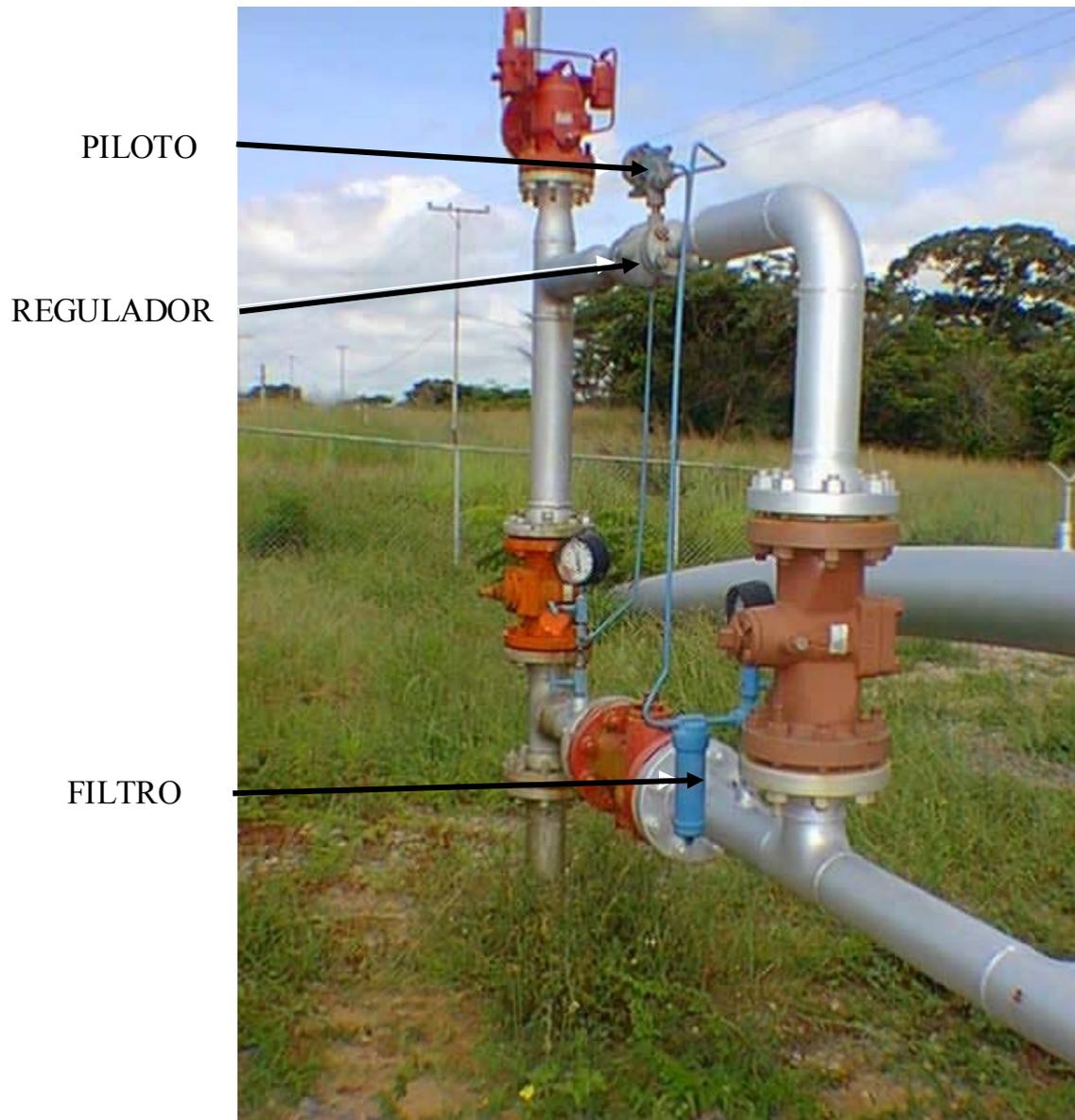
El regulador actúa igualmente bajo el principio de equilibrio de fuerzas que se contraponen en el diafragma. (La suma de las fuerzas del resorte principal y la presión de salida en contraposición a la presión de carga)

Internamente el piloto posee orificios y tubings de diámetro pequeño (aprox. 2 mm). Usualmente se instala a la entrada de alimentación del piloto, el filtro Fisher 254, a fin de evitar el acceso de impurezas presentes en el gas que puedan obstruirlo.



**Figura 3.7. Regulador pilotado tipo 310-32 marca Fisher.**

El Filtro 254E está diseñado para evitar la entrada de viruta, sucio y humedad a todo tipo de instrumento neumático. Tiene un elemento filtrante de fieltro de densidad 25 micrones y su presión de trabajo es 2400psig (*Ver figura 3.8*).



**Figura 3.8.- Regulador pilotado tipo 310-32 marca Fisher.**

### **3.3 Análisis del efecto provocado por la acumulación de azufre elemental en el sistema de transporte y distribución de gas en el tramo Anaco – Jose/Puerto la Cruz.**

El azufre elemental sólido puede ocasionar problemas en 3 partes del sistema:

#### **3.3.1 En los gasoductos:**

Cuando en los gasoductos se mantienen velocidades muy bajas se produce la sedimentación del azufre elemental, acompañado de otras impurezas, lo cual comienza a disminuir la capacidad de transporte efectiva del gasoducto, hasta llegar con el tiempo a niveles de obturación que obligan a su paralización para operaciones de limpieza.

Cuando se opera a velocidades muy altas, las partículas sólidas en suspensión provocan erosión en el interior de las tuberías.

#### **3.3.2 En las estaciones de recepción, regulación, medición y limpieza:**

La exagerada finura del azufre elemental (2 micras) establece dificultades para su captación en los separadores ciclónicos y filtros de cartucho, llegando una proporción importante a los sistemas de regulación y medición, provocando inconvenientes físicos (erosión y obturación) y químicos (corrosión).

Uno de los principales problemas que se pueden presentar en los reguladores de presión son las filtraciones en el obturador, las cuales se dan cuando éste está en la posición cerrada, y el asiento permite el paso de la presión hacia la salida. Generalmente ocurre como consecuencia de daños o erosión en el asiento. Por ejemplo, en ocasiones los asientos de los reguladores pueden verse afectados por partículas existentes en la vía de proceso, que pueden provocar pequeñas imperfecciones en la superficie de cierre. Al combinar el alto caudal y el pequeño orificio creado durante la regulación de la presión, las pequeñas partículas pueden

convertirse literalmente en proyectiles. Y en un caso así, esas pequeñas partículas pueden deteriorar la superficie del asiento y provocar la filtración aguas abajo

Recordemos que los reguladores controlan la presión y son el eje central entre la presión aguas arriba y abajo. La presión en el regulador siempre será más alta en un lado que en el otro. Las aplicaciones más comunes requieren un regulador reductor de la presión, lo que significa que la presión de entrada sufre una caída mecánicamente controlada, dando como resultado una presión relativamente constante en la salida. Y también puede darse el caso contrario, donde la presión de salida es controlada mecánicamente por un controlador de presión, para que la presión de entrada se mantenga relativamente constante. Las filtraciones en el obturador son esencialmente una cuestión de desgaste. Si el asiento del regulador está dañado es necesario realizar un mantenimiento para sustituirlo.

En los medidores de flujo, afectará los medidores tipo turbina y de pistón, resultando menos dañinos en los medidores ultrasónicos y gravimétricos (efecto Coriolis) porque no afectan y por el contrario inclusive favorecen la detección de la señal.

### **3.3.3 En los equipos de combustión**

En los quemadores de gas natural que trabajan a baja presión los inconvenientes se presentan en los trenes de válvulas de regulación y medición; en quemadores de alta velocidad (supersónicos) se presenta la erosión de las boquillas.

En turbinas de gas, el azufre se quema en la cámara de combustión donde se maneja atmósferas muy oxidantes, pero siempre se tendrán partículas impactando en los álabes, por lo cual debe procurarse la eliminación total en los circuitos de limpieza.

### 3.4 Consideración de las consecuencias de la acumulación de azufre elemental en el suministro de gas a los clientes de Puerto la Cruz

En vista de que las cantidades de azufre elemental en el Gasoducto son mínimas (11ppmv aprox.) y se encuentra dentro de los niveles permisibles establecidos en la norma COVENIN 3568-2:2000 (*ver ANEXO A*), no se aprecian consecuencias considerables en el suministro, ya que la obstrucción en las estaciones reguladoras no es total y se garantiza el flujo a cada uno de los clientes.

La composición del gas que se introduce en este sistema está limitada como se indica en la *tabla 3.4*. Estos límites serán diferentes cuando en el sistema se licúe gas natural para almacenamiento y posterior retorno al sistema, cuestión que no se aplica en nuestro sistema en estudio, en donde el gas es enviado directo a venta para luego ser comercializado

**Tabla 3.4.- Limite de componentes mayoritarios y minoritarios.  
Componentes en trazas**

Nombre	Limite	Unidad	Valor
Sulfuro de hidrogeno (H <sub>2</sub> S)	Max.	mg/m <sup>3</sup>	17,3
		ppm molar	12
Azufre total para gas odorizado	Max.	mg/m <sup>3</sup>	38
		ppm molar	28
Azufre total para gas no odorizado	Max.	mg/m <sup>3</sup>	49
		ppm molar	36
Agua	Max.	mg/m <sup>3</sup>	112

Por otra parte se evidencia taponamiento dentro de las tuberías y válvulas (*ver figura 3.9*). Las válvulas son susceptibles de serios problemas de mantenimiento y funcionamiento cuando tiene que trabajar en condiciones de alta velocidad de fluido. La alta velocidad es el gran problema en las válvulas de control, la cual ocurre por la

conversión de la carga de presión en carga de velocidad cuando el fluido sufre una caída de presión al circular por el orificio de la válvula.



**Figura 3.9.- Presencia de Azufre Elemental en el interior de Válvula Reguladora.**

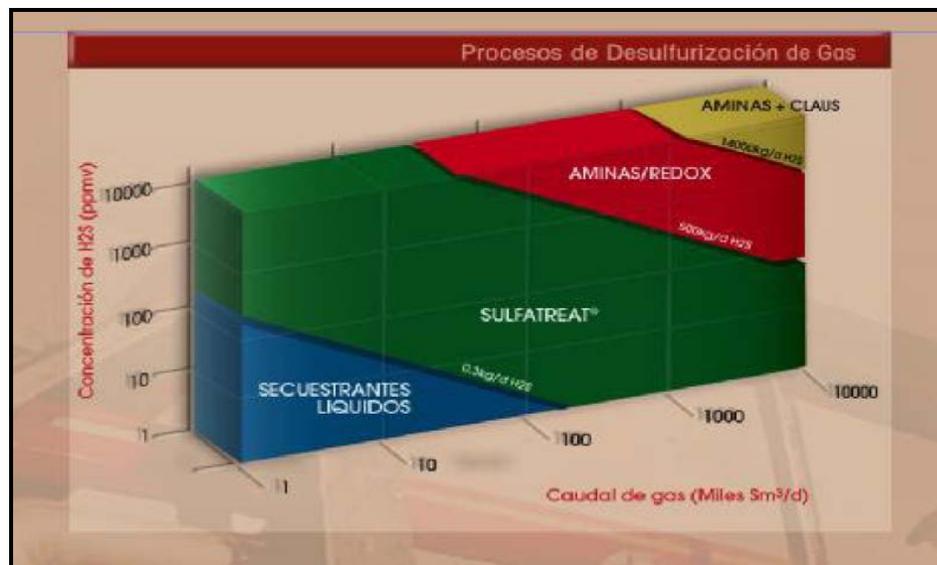
### **3.5 Definición de las medidas que se adoptarán para la prevención de deficiencias en el suministro de gas a los clientes de distribución Puerto la Cruz.**

- ✓ Para evitar su formación se debe disminuir al mínimo posible la presencia de componentes sulfurosos, agua y aire en el gas natural seco. A fin de resolver la problemática se plantean los procesos de desulfurización.

- ✓ Se requiere un filtro que retenga el 100% de las partículas presentes en el gas para evitar la acumulación en el tiempo de sólidos, lo cual nos obligaría a incorporar dentro de las tareas de mantenimiento preventivo la limpieza interna del piloto y el consiguiente reemplazo de sus partes blandas. La utilización de “limpieza química” para eliminar el polvo adherido al interior de las paredes no lo recomendamos, porque se volverá a precipitar, generando un acelerado agravamiento del problema eliminado.

### 3.5.1 Eliminación del contaminante

Mientras esté presente el azufre elemental en el gas que se transporta y distribuye se requiere removerlo de todos los equipos que son susceptibles a fallar por acumulación de los sólidos en sus partes internas. Los procesos de desulfurización (*ver figura 3.10*), permiten reducir la concentración de sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) en el gas a transportar, ya que el  $H_2S$  es altamente corrosivo para los gasoductos y tóxico en caso de venteo.



**Figura 3.10. Procesos de Desulfurización de Gas**

Dichos procesos se clasifican principalmente por las toneladas de azufre diarias removidas, que resultan de una combinación del caudal de gas con la concentración de azufre. Hacia los valores menores se encuentran los procesos secuestrantes, de bajo costo de instalación. Hacia los valores altos, los procesos regenerativos de alto costo de inversión. Actualmente el secuestrante de H<sub>2</sub>S mas utilizado en la industria es el *Sulfatreat*.

*Sulfatreat* es el nombre comercial de un reactivo sólido a base de óxido de hierro para eliminación de H<sub>2</sub>S de corrientes gaseosas. Es la tecnología óptima para casos en donde deba removerse entre 5 y 100 kg/d de H<sub>2</sub>S.

**Tabla 3.5.- Punto optimo de uso de Sulfatreat**

Caudal (Sm <sup>3</sup> /d)	H <sub>2</sub> S ppmV máx.	Kg/d H <sub>2</sub> S *
25.000	200	7,2
50.000	200	14,4
100.000	100	14,4
200.000	100	28,8
300.000	100	43,2
500.000	75	54

\* La carga en Kg/d de H<sub>2</sub>S se puede calcular como = 1,44 x caudal (MMSCMD) x concentración H<sub>2</sub>S (ppmV ent)

*Sulfatreat* se presenta en forma de pequeños gránulos con gran regularidad de tamaño y forma, su color es negro, y todas sus características son similares antes y después de reaccionado. Está compuesto por óxidos de hierro soportados sobre una estructura de silicatos inertes.

Una vez reaccionado, genera pirita (disulfuro de hierro) producto de la reacción entre el *Sulfatreat* y el H<sub>2</sub>S. La pirita es un compuesto estable que no se descompone, por lo que el H<sub>2</sub>S es eliminado en forma irreversible. El reactivo no es tóxico,

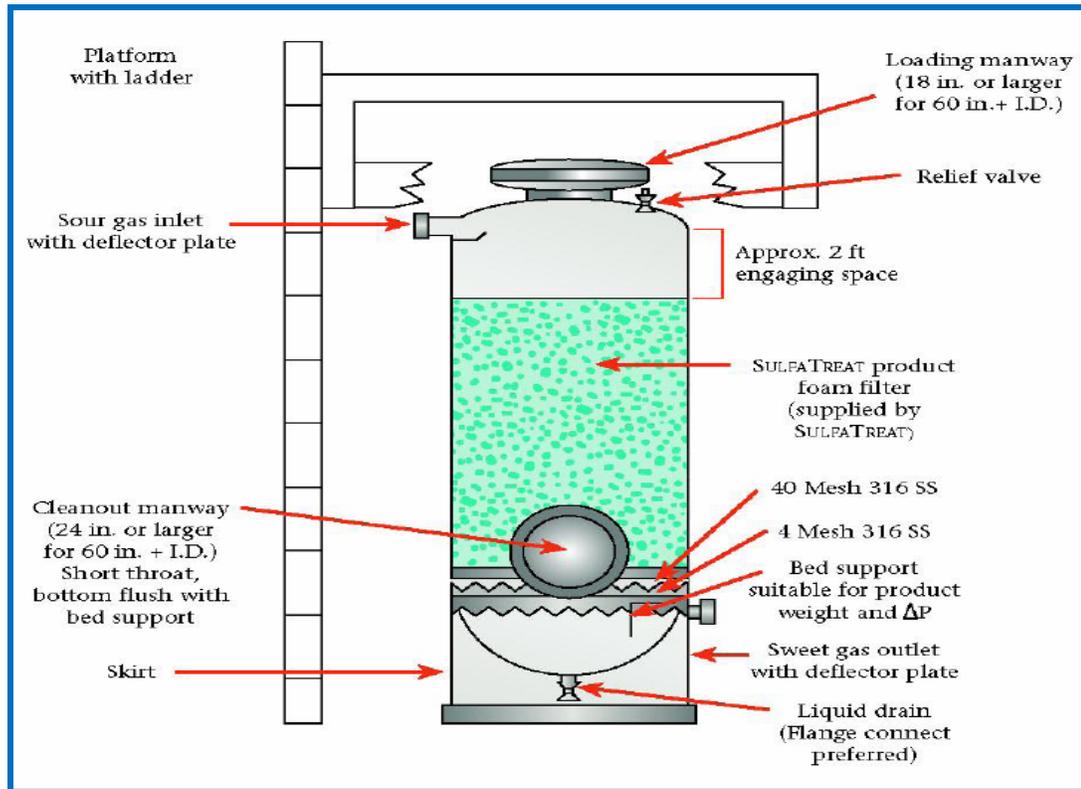
inflamable, explosivo, corrosivo o irritante, ni antes ni después de la operación, por lo que no ocasiona problemas ambientales en su disposición final ni en su manipulación.

El gas ingresa al lecho o batería de lechos por la parte superior y los atraviesa saliendo por la conexión inferior. Durante este proceso el  $H_2S$  reacciona con el Sulfatreat y es removido de la corriente. En el fondo del recipiente pueden acumularse agua (liquida) y/o otros hidrocarburos condensados, los cuales deben purgarse periódicamente.

El diámetro y la altura de los lechos quedan determinados por las hojas de cálculo emitidas por “*MI-SULFATREAT*”, llamadas EPS “*Estimated Perfomance Sheet*”. Las EPS proveen otros datos necesarios para el diseño, tales como:

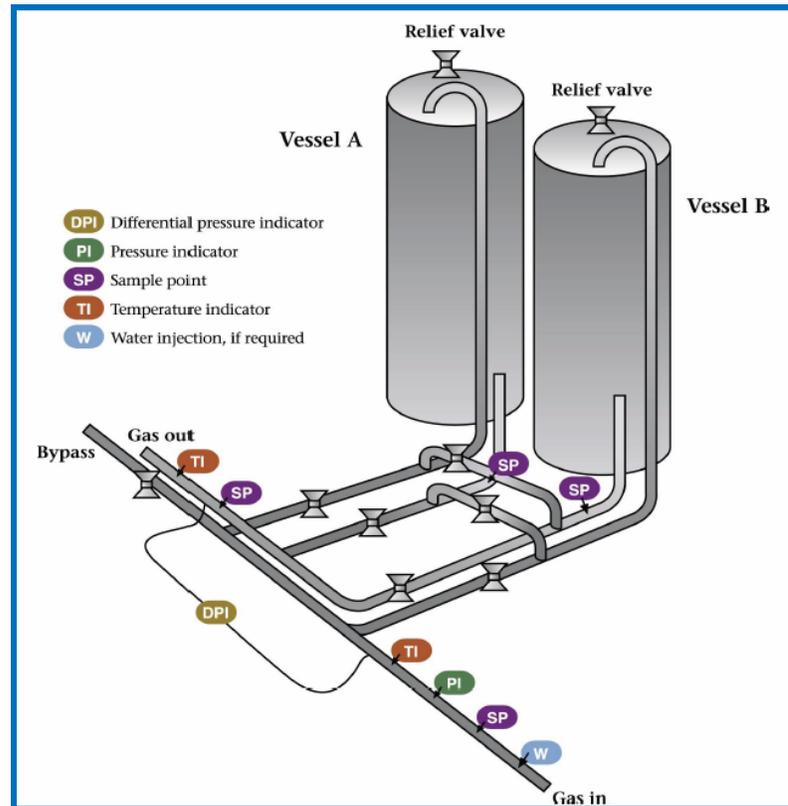
- ***Pérdida de presión***, que es la pérdida de carga a través de los lechos y la cual solo incluye la ocasionada por el producto.
- ***Peso de reactivo requerido para la operación***
- ***Vida esperada del lecho***, en días o meses hasta alcanzar la concentración de salida máxima esperada.

El modelo de flujo dentro de los lechos de *Sulfatreat* es de “tipo pistón”. La **figura 3.11** ilustra un esquema típico de un reactor de *Sulfatreat*. El gas ingresa por la parte superior del lecho, generando una zona de reacción que va desplazándose hacia la parte inferior a medida que el reactivo se va agotando, y sale del reactor por la parte inferior con una concentración de  $H_2S$  que es próxima a 0 ppmv durante la mayor parte de la vida útil del reactivo. Esta característica le confiere al sistema la capacidad de absorber variaciones instantáneas de concentración y/o caudal sin necesidad de maniobras especiales o inversiones extraordinarias en el costo de operación, en términos de costo por kilogramo de  $H_2S$  removido.



**Figura 3.11.- Esquema típico de un reactor de Sulfatreat**

El sistema puede estar compuesto por uno o más reactores en configuraciones en serie o paralelo, con una instalación desde el punto de vista de cañerías e instrumentos muy sencillos, tal como ilustra la *figura 3.12*. Los reactores no requieren internos especiales más allá de los que forman el soporte de lecho (perfilería, mallas y un disco de poliuretano), por lo cual conforman un sistema robusto que no requieren mantenimiento especial.



**Figura 3.12.- Configuración del sistema de Sulfatreat**

Por otra parte se requiere la remoción de azufre con un método que no permita la formación de partículas sólidas de azufre en solución caliente circulante, el cual facilite una operación confiable tanto a presión atmosférica como a alta presión.

*CrystaSulf* es la solución óptima para la remoción de azufre a pequeña y mediana escala. Usando un proceso ano acuoso patentado, el sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) gaseoso es convertido en azufre elemental puro (no tóxico) en forma de cristales, que puede ser mezclado con otras corrientes de azufre para luego ser comercializado. Crystafulf no presenta los problemas comunes de los sistemas REDOX como obstrucción de tuberías, presencia de espuma y altos costos en aditivos químicos.

*Crystasulf* maneja fácilmente los contaminantes del gas (hidrocarburos pesados, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), oxígeno (O<sub>2</sub>), amoníaco (NH<sub>3</sub>), dióxido de sulfuro (SO<sub>2</sub>), entre otros) y tiene la ventaja adicional de grandes turndown. *Crystasulf* es una opción de tratamiento de H<sub>2</sub>S rentable que puede aplicarse a corrientes de gas natural, gas combustible refinado, corrientes de reciclaje de hidrógeno en unidades refinadas HDS y gas de cola en procesos Clauss.

*CrystaSulf* puede ser aplicado para el tratamiento directo del gas natural a alta presión, producción de gas asociado a petróleo, limpieza de las corrientes de syngas, corrientes de gas con alto contenido de CO<sub>2</sub>, corrientes de gas de cola de unidades Claus, gas de venteo de unidades de tratamiento con Aminas y tratamiento con grandes ventajas de las corrientes de reciclaje de hidrógeno en las unidades HDS.

### **3.5.2 Selección del filtro.**

La granulometría del azufre encontrado dentro del piloto es mayoritariamente de 2 micrones (estudiado a través de la microfotografía realizada a la muestra obtenida en Maprinca, ver *figura 3.6*), por lo que se requiere un filtro que retenga partículas de 2 micrones. El filtro Fisher 254E instalado actualmente retiene partículas de 25 micrones o mayores.

Los filtros tienen una eficiencia específica. Por ejemplo un filtro de 2 micrones con una eficiencia de 90 % no retiene el 10 % de partículas de 2 micrones. Por tanto se requiere un filtro que remueva partículas de 1 micrón o menos, con una eficiencia de 99,99%, para garantizar la retención de todos los sólidos.

#### **3.5.2.1 Ubicación del filtro**

Se observó que los sólidos de granulometría pequeña afectan específicamente equipos de instrumentación, debido a la velocidad baja de flujo que propician el

estancamiento de los sólidos en sus partes internas y a que tienen orificios y tubing de diámetro muy pequeños.

En este orden de ideas se requiere un filtro que remueva este tipo de sólido a la entrada de los equipos de instrumentación tales como el piloto del regulador 310-32 o el controlador neumático de la válvula de control de presión.

#### **3.5.2.2 Mantenimiento del filtro.**

La frecuencia de reemplazo del cartucho de filtración, viene dada por el grado de saturación que tenga, el cual se determina a través del diferencial de presión entre la salida y la entrada del filtro; el diferencial de presión no debe exceder de 10 psig, por tanto la instalación del filtro debe incluir tomas para manómetro diferencial.

Se realizará la lectura de presión diferencial cada seis meses. Dependiendo de las condiciones observadas se ajustará la frecuencia.

## **CAPÍTULO V**

### **DISCUSIONES, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **4.1 Identificación de la fuente de azufre elemental en el sistema de transporte y distribución en el tramo Anaco – Jose/Puerto la Cruz.**

##### **4.1.1 Naturaleza del contaminante**

El análisis de laboratorio realizado por la Gerencia de PDVSA Gas, indicó que el sólido de color amarillo que se encuentra en el gas que transporta el sistema Anaco-Jose-Puerto la Cruz, es azufre elemental.

Con relación a este aspecto tenemos que:

1.- Es un contaminante de naturaleza corrosiva, el manual GPSA volumen I lo indica en la sección 2 “Product specifications”, Pág. 2-5 (*ver ANEXO B*).

2.- La Norma COVENIN 3568-2:2000 (*ver Tabla 3.4*), la cual de valores mayoritarios permisibles de contaminantes para gas natural, no hace referencia al azufre elemental.

El análisis de calidad de gas que lleva a cabo rutinariamente la gerencia de Transporte PDVSA Gas, reporta el valor de H<sub>2</sub>S gaseoso de 11ppm molar (no se analizan los contaminantes sólidos). Se puede observar que el valor de H<sub>2</sub>S reportado se encuentra dentro de los límites permisibles, sin embargo la presencia del contaminante en el gas es la causa de la formación del azufre elemental.

Para determinar el origen del azufre elemental en el gas residual se requiere evaluar:

- ✓ La factibilidad de formación del azufre en la corriente de gas producto de reacciones químicas secundarias de los secuestrantes de H<sub>2</sub>S que se inyectan en el norte de Monagas.
- ✓ La factibilidad de que provenga de las fuentes de gas tratado desde el norte de Monagas.

En el gas que se extrae de los pozos, asociado con el petróleo, se encuentran contenidas varias impurezas con diferente comportamiento fisicoquímico, tales como componentes de H<sub>2</sub>S, vapor de agua, dióxido de carbono, entre otros. Estos componentes en el interior de la tubería de gas, generan formas de corrosión ácida, por lo cual deberían de ser extraídos en la planta de tratamiento y separación de líquidos.

Para extraer H<sub>2</sub>S y CO<sub>2</sub> del gas natural tradicionalmente se han utilizado aminas primarias (MEA) y secundarias (DEA) ó (DGA). Posteriormente, a partir del año 2000 se presentó un inconveniente importante, esta corriente de gas contaminante (CO<sub>2</sub> y/o H<sub>2</sub>S) ha sido separada del gas natural, pero sigue existiendo como tal, concentrado en otra corriente gaseosa. El problema del H<sub>2</sub>S no ha sido eliminado. Este efluente debe tratarse entonces en otro proceso que transforme el H<sub>2</sub>S en azufre elemental, disulfuro de hierro u otra sustancia inocua.

Si el proceso utilizado implementado fue el REDOX, éste reduce directamente el H<sub>2</sub>S del gas a azufre elemental. Las plantas de aminas, en cambio, separan el H<sub>2</sub>S en el absorbedor y lo liberan a la atmósfera inalterado por la cabeza del despojador.

En el caso del proceso REDOX, la reacción de reducción ocurre en el absorbedor:



El origen químico de las partículas formadas establece una condición granulométrica muy pequeña, presentándose predominantemente partículas muy finas, menores a 1 micra, lo cual determina grandes dificultades de captación.

#### **4.2 Estudio de el principio de operación de los pilotos de reguladores FISHER 310-32 instalados en el sistema Anaco Jose/ Pto. la Cruz.**

Los reguladores de presión son aparatos de control de flujo diseñados para mantener una presión constante aguas abajo de los mismos. Este debe ser capaz de mantener la presión, sin afectarse por cambios en las condiciones operativas del proceso para el cual trabaja. Al seleccionar un regulador para una aplicación específica, no sólo se deben tener en cuenta los requisitos de presión, sino también el caudal, la composición del gas o del líquido y la temperatura. La adecuada selección puede ayudar a evitar condiciones adversas como la caída en la presión de salida o fugas en el obturador por erosión del mismo; y por otro lado, una selección inadecuada puede provocar fallos como un mal control de la presión o la contaminación de las conducciones de gas. La caída en la presión de salida afecta al funcionamiento global de un regulador, y se da cuando se requiere más caudal en la salida del que el regulador puede suministrar.

La selección de un regulador, como en la mayoría de los equipos, está ligada a consideraciones económicas, de operación y mantenimiento. El énfasis que se haga para definir con exactitud el requerimiento de presión y flujo del proceso, así como los márgenes de variación posibles y su impacto en la producción, es el primer paso para garantizar una buena elección.

Estos equipos, si se seleccionan adecuadamente, pueden operar por muchos años sin acarrear grandes costos de mantenimiento, pero la falla de uno de ellos puede significar la parada del equipo que alimenta, de un tren de producción o la parada de la planta en su totalidad. Por eso es importante tomar las previsiones en la instalación

a fin de contar con desvíos o bypass que permitan realizar labores de mantenimiento o recambio sin afectar la continuidad de flujo. También es aconsejable contar con repuestos a la mano de las partes susceptibles a daño, tales como: diafragma, carcasa, resortes, etc. y dependiendo de la criticidad del proceso otro regulador de reemplazo.

#### **4.3 Análisis del efecto provocado por la acumulación de azufre elemental en el sistema de transporte y distribución de gas en el tramo Anaco – Jose/Puerto la Cruz.**

El azufre elemental sólido puede ocasionar problemas en 3 partes del sistema:

En los gasoductos. Al mantener bajas velocidades en el flujo de gas, el azufre se precipita dentro del gasoducto provocando restricciones en el paso del fluido y a lo largo del tiempo obstruye las tuberías, obligando a realizar labores de mantenimiento periódicamente. En cambio, cuando las velocidades son elevadas las partículas sólidas provocan erosión en el interior del gasoducto.

En las Estaciones de Recepción, Regulación, Medición y Limpieza. Al viajar a través del gasoducto, las partículas de menor tamaño no son retenidas por los filtros llegando así a los pilotos de los reguladores afectando su funcionamiento y provocando daños físicos (como la erosión) y químicos (como la corrosión). En los reguladores de presión se presentan problemas de filtraciones en el obturador, generalmente ocurren cuando este está cerrado. Al combinar el alto caudal y el pequeño orificio creado durante la regulación de la presión, las pequeñas partículas pueden convertirse literalmente en proyectiles. Y en un caso así, esas pequeñas partículas pueden deteriorar la superficie del asiento y provocar la filtración aguas abajo. Si el asiento del regulador está dañado, es necesario realizar un mantenimiento para sustituirlo.

En los equipos de combustión. En estos equipos se evidencia erosión en las boquillas, y en los trenes de válvulas de regulación y medición. En las turbinas de gas, el azufre impacta los alabes por lo cual se debe procurar su remoción total durante los procesos de desulfuración.

#### **4.4 Considerar las consecuencias de la acumulación de azufre elemental en el suministro de gas a los clientes de Puerto la Cruz.**

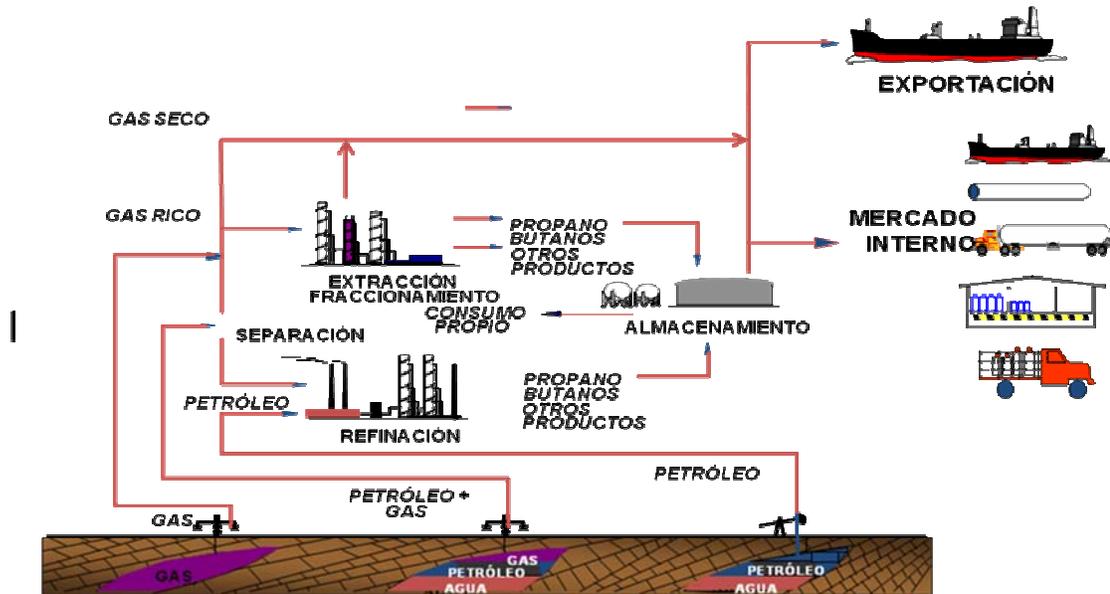
El flujo del líquido puede producir erosión porque la alta velocidad “lava” la superficie del metal con lo que la película protectora se elimina en forma continua y se desgasta el metal. También ocurre con fluidos que contienen partículas sólidas como incrustaciones y gotitas de líquido que producen la abrasión de la superficie del metal. Por lo general, los gases secos y limpios no ocasionan problemas de erosión, pero la presencia de gotitas de líquido o de sólidos puede ocasionar erosión severa en un tiempo corto. El proceso se acelera mucho cuando la válvula tiene filtraciones o funciona cerca del asiento; esta erosión se denomina turbulencia.

Sin embargo, la tasa de flujo requerida por dichos clientes no se ve afectada por la acumulación de sólidos e incluso los porcentajes de  $H_2S$  contenidos en el gas que la empresa distribuye, se encuentra entre los niveles comerciales permisibles y es por esto que hasta los momentos no se han tomado las medidas de eliminación de  $H_2S$  que se requieren, realizando mantenimientos constantes a los equipos y no eliminando la causa del problema desde la raíz. Se debe tomar en cuenta que los clientes de distribución Puerto La Cruz cuentan con sistemas de regulación en sus instalaciones, al igual que la empresa, por lo cual también están expuestos a presentar los mismos problemas en el transcurso del tiempo con respecto a los procesos en sus Estaciones de Regulación y Medición (ERM) en estos equipos se encontraron pequeñas trazas de azufre elemental.

Mientras esté presente el azufre elemental en el gas que se transporta y distribuye se requiere removerlo de todos los equipos que son susceptibles a fallar por acumulación del sólido en sus partes internas. A fin de resolver la problemática se plantean los procesos de desulfurización los cuales permiten reducir la concentración de sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) en el mismo.

#### **4.5 Definición de las medidas que se adoptarán para la prevención de deficiencias en el suministro de gas a los clientes de distribución Puerto la Cruz.**

Si se analiza el negocio del gas en Venezuela (*ver figura 4.1*), se tienen diversas corrientes de gas como es el caso del gas seco o gas directo a venta (corriente de gas manejado en el sistema Anaco – Jose/Puerto la Cruz). Estas corrientes de gas seco provienen de fuentes directo del yacimiento (luego de haber pasado por la etapa de separación), así como aquellas que provienen de la planta de extracción, en donde han sido tratadas con diversos procesos como el endulzamiento y la deshidratación, esto con el fin de eliminar aquellas impurezas que se encuentran contenidas en el gas, como es el caso del  $H_2S$ . En vista de que no ha sido removido completamente el  $H_2S$  de la corriente gaseosa, este se ha precipitado a través del gasoducto en forma de azufre elemental, por lo cual se requieren de soluciones capaces de evitar la formación de dichos sólidos en la tubería o eliminar el azufre en el "punto de origen", de modo que se garantice una operación confiable en todo el Sistema de Transmisión y Distribución de gas a venta.



**Figura 4.1.- Negocio del Gas Natural**

Siendo inevitable la formación de partículas sólidas como el azufre elemental en el gasoducto, solamente existen dos posibilidades de minimizar los problemas que ocasiona: Evitarlo y Removerlo.

Como la empresa que presenta el problema planteado requiere respuestas de rápida aplicación, una solución a corto plazo es la instalación de filtros en serie con eficiencias específicas.

En la filtración, las partículas suspendidas en el gas, se separan mecánica o físicamente usando un medio poroso que retenga las partículas en forma de fase separada permitiendo el paso del filtrado sin sólidos. Las partículas sólidas suspendidas pueden ser muy finas (del orden de micrómetros) o bastante grandes, y en algunos casos se requiere una eliminación completa de dichas partículas y en otros, basta con una eliminación parcial.

Al analizar las muestras obtenidas en las estaciones de regulación, se observó la diferencia en el tamaño de partículas entre una y otra estación. En el caso de ERP Manprica (*ver Figura 3.2*), se encontraron partículas del orden de 25 micrones, estos sólidos logran entrar en el piloto porque el filtro 254E instalado en la línea de gas, está especificado para retener partículas más grandes (25 micrones o mayores). En las estaciones subsiguientes el tamaño de partículas se fue reduciendo, afectando equipos cuyos orificios de regulación son de dimensiones muy pequeñas (1 mm de diámetro aprox.) y los sólidos en suspensión en el gas se van depositando en el tiempo, hasta tapar completamente los mismos.

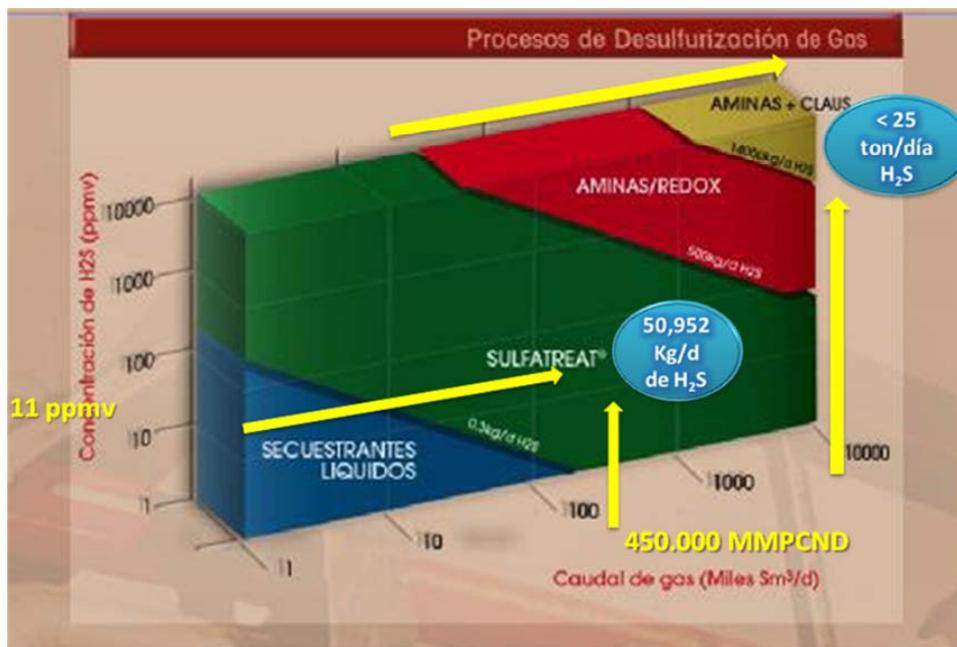
El medio para filtraciones industriales debe tener ciertas características, la primera y más importante es que permita separar los sólidos de la suspensión y producir un filtrado transparente. Además, los poros no se deben obstruir con facilidad para que la velocidad del proceso no sea demasiado lenta. Obviamente, debe tener una resistencia suficiente para no rasgarse y no ser afectado por los productos químicos presentes.

Se colocarían filtros con una eficiencia de 90 %, al inicio del sistema de transmisión, los cuales se encargaran de retener las partículas de mayor tamaño. Estos no serán capaces de retener partículas de 2 micrones, por tanto se requiere un filtro que remueva partículas de 1 micrón o menos, con una eficiencia de 99,99%, para garantizar la retención de todos los sólidos. Cabe resaltar que cuando la concentración de sólidos es mínima, los filtros operan por tiempos muy largos, antes de que sea necesario realizar operaciones de limpieza. Con la colocación de filtros en cascada, lo que se espera es que cada filtro pueda retener los sólidos del tamaño para el cual han sido diseñados y a la vez evitar la saturación en el medio filtrante, de modo que se reduzcan las labores de mantenimiento en dichos filtros.

Se consideraron soluciones que mitiguen o eliminen el problema de raíz, por lo que se planteó el uso del secuestrante *Sulfatreat* como tratamiento a mediano plazo. El *Sulfatreat* absorbe las partículas de H<sub>2</sub>S pero no las elimina por completo. El contaminante removido del gas reacciona con el Sulfatreat y queda incorporado al reactivo, el cual debe ser reemplazado cada determinado tiempo.

Al analizar la *Figura 4.2*, la cual compara los diferentes procesos de desulfuración del gas con respecto al caudal manejado y al contenido de H<sub>2</sub>S en el mismo, se observó que la tecnología Sulfatreat tiene un rango de aplicabilidad que la ubica entre los secuestrantes líquidos (cuyo costo de instalación inicial es nulo a expensas de un costo de operación sensiblemente mayor) y otras tecnologías regenerativas cuya inversión inicial es alta en contrapartida con su bajo costo por kilogramo de H<sub>2</sub>S removido.

Por otra parte, se debe considerar que el punto óptimo de uso de Sulfatreat se encuentra en corrientes cuyo contenido de H<sub>2</sub>S se encuentra entre 10 – 50 Kg/d de H<sub>2</sub>S, como se estudio en la *Tabla 3.5*. Por lo que al analizar el caudal de gas de 450.000 (Sm<sup>3</sup>/d) ó 0,45 (MMSCMD) que se maneja en el Sistema Anaco – Jose/Puerto la Cruz, se obtuvo un valor de 50,952 Kg/d de H<sub>2</sub>S, el cual se escapa en mínimas proporciones del rango optimo para la utilización de este método.



**Figura 4.2.- Comparación de todos los Procesos de Desulfuración**

Sin embargo se requiere la remoción de azufre con un método que no permita la formación de partículas sólidas, el cual facilite una operación confiable tanto a presión atmosférica como a alta presión, como es el caso del *Crystasulf*.

En las reacciones del proceso *CrystaSulf*, el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) gaseoso es convertido en azufre elemental puro (no tóxico) en forma de cristales, que puede ser utilizado como relleno del suelo en uso agrícola o puede ser mezclado con otras corrientes de azufre. CrystaSulf no presenta los problemas comunes de los sistemas REDOX como obstrucción de tuberías, presencia de espuma y altos costos en aditivos químicos. Además, éste proceso no permite la formación de partículas sólidas de azufre en la solución circulante, lo cual garantiza una operación confiable tanto a presión atmosférica como a alta presión (funciona confiablemente desde presión atmosférica hasta 2000+ psi).

## CONCLUSIONES

- ✓ El origen del azufre elemental presente en la corriente de gas es producto de reacciones químicas secundarias del proceso REDOX utilizado para la desulfuración al norte de Monagas.
- ✓ La presencia del azufre elemental en los gasoductos disminuye la capacidad de transporte a lo largo del sistema.
- ✓ Los sólidos afectan específicamente equipos de instrumentación ya que las pequeñas partículas se adhieren a las paredes internas de los mismos perturbando su funcionamiento.
- ✓ La obstrucción causada por el azufre en el regulador, influye en el ajuste de la presión aguas abajo.
- ✓ Para evitar el ingreso de partículas sólidas se colocan filtros a la entrada al piloto del regulador FISHER 310-12, por ser éste el encargado de realizar la función de regulación de la presión.
- ✓ La solución a mediano plazo es la utilización de Sulfatreat, ya que es una tecnología más económica que los secuestrantes líquidos, en especial si la carga de H<sub>2</sub>S en la corriente es superior a 1 Kg/D.
- ✓ La vida útil del Sulfatreat es función del volumen de reactivo y de las condiciones de proceso.

- ✓ Sulfatreat convierte el 90% del H<sub>2</sub>S en azufre elemental y agua, en un solo paso con una selectividad  $\geq 99\%$  del azufre elemental
- ✓ Un reactivo sólido con mejoras permite operar en una diversidad muy amplia de condiciones de operación.
- ✓ En las reacciones del proceso de CrystaSulf, el sulfuro de hidrogeno (H<sub>2</sub>S) gaseoso es convertido en azufre elemental puro (no toxico) en forma de cristales que pueden ser fácilmente removidos de la corriente gaseosa con la ayuda de filtros.

## RECOMENDACIONES

- ✓ Para evitar la formación de azufre elemental se debe disminuir en la medida de lo posible la presencia de componentes sulfurosos, carbonados, agua y aire en el gas natural seco. El cumplimiento de esto depende exclusivamente del tratamiento aplicado en la planta de remoción de contaminantes.
- ✓ Para evitar consecuencias graves, se deben extraer los sólidos del sistema en forma continua e inmediata a su formación, evitando así acumulaciones y arrastre hacia los centros de consumo.
- ✓ Se debe hacer una evaluación del perfil del tamaño de partículas encontradas en el gasoducto que nace en Anaco hasta la última estación para determinar el tipo de filtro a utilizar.
- ✓ Se sugiere aplicar los criterios de tamizado, es decir, colocar filtros en serie de mayor a menor mesh, para retener partículas de diámetros variables que vayan desde 25 hasta 1 micrón.
- ✓ Se necesita extender el estudio del contenido de azufre elemental en los sistemas de distribución de Centro-Centro occidente y Anaco-Puerto Ordaz., para determinar los tamaños de las partículas encontradas en estos sistemas y así poder seleccionar correctamente el procedimiento a utilizar.
- ✓ Se requiere el uso de Filtros Coalescentes, los cuales proporcionan un buen filtrado del gas a altas velocidades. Son específicamente diseñados para eliminar sólidos en suspensión y la suciedad de las tuberías de gas.

- ✓ Antes que el gas ácido ingrese al sistema de reactores de Sulfatreat, se debe atomizar agua de modo de lograr la saturación de la corriente, condición fundamental para el buen funcionamiento del sistema.
  
- ✓ Se recomienda tener en cuenta la cantidad de azufre que se desea remover antes de aplicar el proceso de Crystalsulf, debido a que este es eficiente a media escala (0.1 a 25 toneladas por día) de corriente de gas tratado; si se requiere la remoción de una mayor cantidad de azufre, se sugiere el uso del proceso Claus.

## **BIBLIOGRAFIA**

SMITH, C AND CORRIPIO A; “Principles and practice of automatic process control”. John Wiley & Sons, Inc. Segunda Edición

GEANKOPLIS, C. J. “Procesos De Transporte Y Operaciones Unitarias”. Compañía Editorial Continental, S.A. Tercera Edición. México (1998)

CRANE, “Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías”. Ediciones Mc. Graw Hill, México (Welker, “Filters/filter dryers and other contaminate indication/ removal products”. Since (1992).

PARKER.”Filtros de coalescencia, partículas, membrana, bobinado y manga”. Disponible en la página: <http://www.parker.com/portal/site/PARKER/menuitem>

FLARGENT, “Endulzamiento de gas natural con Sulfatreat”. Disponible en la página: <http://www.flargent.com/DocDownload.php?filename=EndulzamientodeGasNatural>

CRYSTATECH, “Proceso cristasulf”. Disponible en la página: [http://www.crystatech.com/spn/markets/tail\\_gas\\_treating.cfm](http://www.crystatech.com/spn/markets/tail_gas_treating.cfm)

Virtual Pro, Disponible en la página: <http://www.revistavirtualpro.com/revista/index.php?ed=2007-08-01&pag=8>

<http://www.pdvsa.com>

<http://www.intranet.pdvsa.com>

<http://www.enagas.gov.ve>

## **METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO**

<b>TÍTULO</b>	Evaluación del efecto de azufre elemental presente en el piloto regulador fisher 310-32 en el sistema de transporte y distribución de gas a venta en el tramo Anaco – Jose/Puerto la Cruz
<b>SUBTÍTULO</b>	

**AUTOR (ES):**

<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	<b>CÓDIGO CULAC / E MAIL</b>
<b>González Siulgreth</b>	<b>CVLAC:</b> 17.263.939 <b>E MAIL:</b> siul68@hotmail.com
	<b>CVLAC:</b> <b>E MAIL:</b>
<b>Solorzano Arianny</b>	<b>CVLAC:</b> 16.398.907 <b>E MAIL:</b> ariannyslezama@hotmail.com
	<b>CVLAC:</b> <b>E MAIL:</b>

**PALÁBRAS O FRASES CLAVES:**

Azufre Elemental

---

Gas Natural

---

Transporte y Distribución

---

Estación de Regulación y Medición

---

Reguladores FISHER 310-32

---

Proceso REDOX

---

Desulfuración

---

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

ÁREA	SUBÁREA
<b>Ingeniería y ciencias aplicadas</b>	
	<b>Ingeniería de Petróleo</b>

**RESUMEN (ABSTRACT):**

Mientras esté presente el azufre elemental en el gas que se transporta y distribuye se requiere removerlo de todos los equipos que son susceptibles a fallar por acumulación del sólido en sus partes internas. Solamente existen dos posibilidades de minimizar los problemas que ocasiona: Evitarlo y Removerlo. A fin de resolver la problemática se plantean los procesos de desulfuración los cuales permiten reducir la concentración de sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) en el mismo

---



---



---



---



---

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:****CONTRIBUIDORES:**

<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	<b>ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL</b>				
<b>Avendaño Isvelia</b>	<b>ROL</b>	CA	AS X	TU	JU
	<b>CVLAC:</b>				
	<b>E_MAIL</b>				
	<b>E_MAIL</b>				
<b>Uricare Jairo</b>	<b>ROL</b>	CA	AS	TU	JU X
	<b>CVLAC:</b>				
	<b>E_MAIL</b>				
	<b>E_MAIL</b>				
<b>Parra Frank</b>	<b>ROL</b>	CA	AS	TU	JU X
	<b>CVLAC:</b>				
	<b>E_MAIL</b>				
	<b>E_MAIL</b>				
	<b>ROL</b>	CA	AS	TU	JU
	<b>CVLAC:</b>				
	<b>E_MAIL</b>				
	<b>E_MAIL</b>				

**FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:**

2009	12	03
<b>AÑO</b>	<b>MES</b>	<b>DÍA</b>

**LENGUAJE: SPA**

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:****ARCHIVO (S):**

<b>NOMBRE DE ARCHIVO</b>	<b>TIPO MIME</b>
TESIS. Efecto del azufre elemental en el sistema de	Application/msword
transmisión y distribución.doc	

**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: \_\_\_\_\_

TEMPORAL: \_\_\_\_\_

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

\_\_\_\_\_ Ingeniero de petróleo \_\_\_\_\_

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

\_\_\_\_\_ Pregrado \_\_\_\_\_

ÁREA DE ESTUDIO:

\_\_\_\_\_ Departamento de petróleo \_\_\_\_\_

INSTITUCIÓN:

\_\_\_\_\_ Universidad de Oriente Núcleo Anzoátegui \_\_\_\_\_

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:****DERECHOS**

De acuerdo al **ARTÍCULO 44** del reglamento de Trabajos de Grado

---

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

---

---

---

---

**AUTOR**

González Siulgreth  
C.I.: 17.263.939

---

**AUTOR**

Solorzano Arianny  
C.I.: 16.398.907

---

**TUTOR**

Ing. Ivelia Avendaño

---

**JURADO**

Ing. Jairo Uricare

---

**JURADO**

Ing. Frank Parra

---

**POR LA SUBCOMISION DE TESIS**

Ing. Iraima Salas