



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMA PARA INYECCIÓN DE GAS A ALTA PRESIÓN PARA REMOVER REMANENTES DE PETRÓLEO

Joel Tavara-Arica

Piura, setiembre de 2016

FACULTAD DE INGENIERÍA

Máster en Ingeniería Mecánico – Eléctrica con mención en Sistemas
Energéticos y Mantenimiento

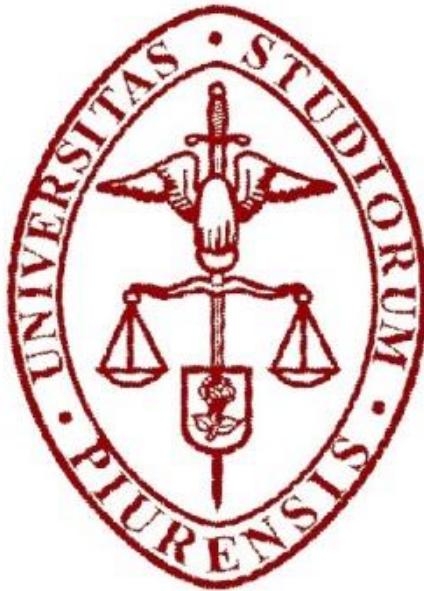
Tavara, J. (2016). *Dimensionamiento de sistema para inyección de gas a alta presión para remover remanentes de petróleo* (Tesis de Máster en Ingeniería Mecánico – Eléctrica con mención en Sistemas Energéticos y Mantenimiento), Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una [licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](#)

[Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura](#)

UNIVERSIDAD DE PIURA
FACULTAD DE INGENIERÍA



**Dimensionamiento de sistema para inyección de gas a alta presión para remover
remanentes de petróleo**

Tesis para optar el Grado de
Máster en Ingeniería Mecánico – Eléctrica con mención en Sistemas Energéticos y
Mantenimiento

Joel Cristhian Tavera Arica

Asesor: Dr. Ing. Daniel Marcelo Aldana

Piura, Setiembre 2016

**A mi Esposa e Hijos Cristhian, Franco y Flavia,
Por ser el estímulo para mi crecimiento profesional.**

Prólogo

Los motivos y razones para el desarrollo del presente caso de estudio, son diversos, entre los que podemos mencionar: El cumplimiento del plan de reactivación y desarrollo de la producción del Lote X. El incremento de demanda energética en el país; los cuales, han contribuido a la necesidad de contar, entre otras alternativas, con mayor producción de petróleo. Lo cual, permitirá incrementar la generación de energía; y con ello suministrar la energía requerida por los sistemas debido al crecimiento industrial y económico del país.

La importancia del tema desarrollado se fundamenta, en extraer la mayor cantidad de reservas de crudo, de pozos que por su baja producción, pasarían a estado de abandono. La energía requerida para dicha extracción, se obtendría, a partir de reservas de gas en pozos de funcionamiento intermitente y producción excedente de gas. Además de eliminar el venteo y quemar los excedentes de flujo de gas, en cumplimiento de las normativas de Seguridad, Higiene y Protección Ambiental Intrínseca de la producción de gas requerida por los estándares nacionales y la regulación legal aplicable.

Resumen

El tema propuesto consiste en el dimensionamiento del sistema - facilidades de superficie - para la extracción de remanentes de petróleo mediante, la técnica de recuperación secundaria denominada, inyección de gas a alta presión. Con el fin de viabilizar el uso de la producción de gas no asociado de pozos gasíferos, que trabajan con la modalidad de desfogue en forma intermitente y restituir la energía del reservorio e incrementar el factor de recuperación de hidrocarburo.

Los cálculos específicos se realizaron para dimensionar las facilidades de recolección - para captar la producción de gas – conformado por las líneas de recolección de cada uno de los ocho pozos gasíferos, las facilidades de depuración – para retirar los líquidos – conformado por un separador bifásico, dos filtros coalescentes y un acumulador de gas, las facilidades de compresión – para elevar la presión a 3000 psig – conformado por dos compresores reciprocantes y el dimensionamiento de las líneas de inyección hacia ocho pozos inyectoros.

Los resultados obtenidos confirman que la metodología empleada en el presente trabajo permitió definir, dimensionar, seleccionar y especificar los equipos requeridos por el sistema para inyección de gas a alta presión para remover remanentes de petróleo. Así también, la evaluación financiera del proyecto confirmo la viabilidad para su implementación.

Índice

1. Capítulo 1.....	1
Aspectos generales.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Antecedentes.....	1
1.3 Justificación.....	2
1.4 Códigos, Normas y Especificaciones.....	3
2. Capítulo 2.....	5
Metodología del sistema de inyección.....	5
2.1 Técnicas de inyección.....	5
2.1.1 Sistema <i>Plunger Lift</i>	5
2.1.2 Sistema de inyección de agua.....	6
2.1.3 Sistema de inyección de gas.....	6
2.2 Procedimiento de cálculo.....	7
2.2.1 Líneas de proceso.....	7
2.2.1.1 Premisas.....	7
2.2.1.2 Metodología de diseño.....	9
2.2.1.3 Esquemático de proceso.....	11
2.2.2 Recipientes.....	12
2.2.2.1 Premisas.....	13
2.2.2.2 Metodología de cálculo para separadores.....	15
2.2.2.3 Metodología de cálculo para almacenamiento de gas de arranque.....	19
2.2.3 Estación de Compresión.....	21
2.2.3.1 Criterios de diseño.....	21
2.2.4 Líneas de recolección.....	23

2.2.4.1	Criterios de diseño.....	23
2.2.4.2	Esquemático de flujo de proceso.....	24
2.2.5	Líneas de inyección.....	24
2.2.5.1	Criterios de diseño.....	24
2.2.5.2	Esquemático de flujo de proceso.....	25
3.	Capítulo 3.....	27
	Caso de estudio.....	27
3.1	Descripción del caso de estudio.....	27
3.1.1	Entrada a planta.....	27
3.1.2	Separador de producción.....	27
3.1.3	Distribución de gas.....	28
3.1.4	Filtro de gas combustible.....	28
3.1.5	Filtro de gas de potencia para instrumentos.....	29
3.1.6	Área de gas de arranque.....	29
3.1.7	Área de compresión.....	30
3.1.8	Múltiple de alta presión.....	31
3.2	Cálculos específicos.....	31
3.2.1	Premisas.....	31
3.2.1.1	Cabezal de alimentación.....	31
3.2.1.2	Alimentación a depurador V-01.....	36
3.2.2	Recipientes.....	38
3.2.2.1	Cálculo del depurador de gas de entrada.....	38
3.2.2.2	Cálculo del filtro de gas combustible e instrumentos.....	44
3.2.2.3	Cálculo del flujo másico al filtro de gas combustible.....	45
3.2.2.4	Cálculo del tanque de almacenamiento de gas de arranque.....	50
3.2.3	Estación de compresión.....	51
3.2.3.1	Descripción del proceso modelo de simulación.....	51
3.2.3.2	Evaluación del sistema.....	52
3.2.4	Líneas de recolección.....	60
3.2.4.1	Descripción del proceso modelo de simulación.....	60
3.2.4.2	Casos evaluados.....	60
3.2.4.3	Validación del sistema.....	60
3.2.4.4	Evaluación del sistema fluyendo a EZA-04.....	61

3.2.5	Líneas de inyección.....	62
3.2.5.1	Descripción del proceso modelo de simulación.....	62
3.2.5.2	Casos evaluados.....	62
3.2.5.3	Evaluación escenario 1.....	62
3.2.5.4	Evaluación escenario 2.....	63
4.	Capítulo 4.....	65
	Análisis económico del proyecto.....	65
4.1	Presupuesto de inversión (CAPEX).....	65
4.1.1	Suministros de materiales.....	65
4.1.2	Suministros de Equipos.....	65
4.1.3	Costos de construcción.....	66
4.2	Costos de operacionales (OPEX).....	67
4.3	Cálculo de ingresos	67
4.4	Evaluación financiera.....	68
	Conclusiones.....	69
	Bibliografía.....	71
	Anexos.....	73
	Anexo A. Cromatografía del Gas.....	73
	Anexo B. Cálculo del factor de descarga (C1) y factor de tamaño (C2).....	74
	Anexo C. Longitudes equivalentes de tuberías y accesorios.....	76
	Anexo D. Constantes para el Dimensionamiento de Separadores.....	76
	Anexo E. Tiempo de retención del líquido en el recipiente.....	77
	Anexo F. Factor de compresibilidad (Z).....	77
	Anexo G. Gráfico para Selección de Filtros.....	80
	Anexo H. Esquemático de las líneas de recolección e inyección, validación del modelo.....	81

Anexo I1. Plano 1. Sistema de Inyección de Gas.....	83
Anexo I2. Plano 2. Diagrama de Flujo de Proceso.....	84
Anexo I3. Plano 3. Arreglo General.....	85
Anexo I4. Plano 4. Fabricación Depurador de Gas de Entrada (V-01). Hoja 1/2.....	86
Anexo I4. Plano 4. Fabricación Depurador de Gas de Entrada (V-01). Hoja 2/2.....	87
Anexo I5. Plano 5. Fabricación de Pulmón de Gas de Arranque.....	88

Capítulo 1

Aspectos generales

1.1. Introducción

La producción de petróleo se obtiene en la superficie en función de la energía confinada en los yacimientos del subsuelo. Con el tiempo, según se vayan extrayendo los fluidos, esta energía, en forma de presión del reservorio, disminuirá paulatinamente junto con el volumen producido. En estas condiciones, no es posible la recuperación o extracción de todo el hidrocarburo contenido en el reservorio, a menos que se le restituya el total o parte del contenido extraído.

Los procedimientos para restituir la energía del reservorio e incrementar el factor de recuperación de hidrocarburo se conocen como técnicas de Recuperación Secundaria, siendo las principales técnicas y/o metodologías: Inyección de Gas, Inyección de Agua e Inyección de Nitrógeno.

Por tanto para mantener un suministro confiable de petróleo, preservar la energía de los yacimientos e incrementar el volumen de reservas de petróleo recuperables, se requiere la adecuación de los sistemas de recolección, manejo y compresión de gas.

La finalidad del presente caso de estudio es definir y dimensionar las facilidades de superficie; para captar la producción de 08 pozos gasíferos, y el equipamiento para inyectar gas al reservorio. La captación de gas será de forma continua garantizando el caudal de gas para cada uno de los 08 pozos inyectoros.

El caso de estudio se encuentra ubicado en el campo denominado Laguna Zapotal del Lote X, Departamento de Piura, Provincia de Talara, Distrito de El Alto; donde se desarrollan las operaciones de explotación y producción de hidrocarburos a cargo de Petrobras Energía Perú S.A.

1.2. Antecedentes

Dentro de la política puesta en marcha por el Gobierno del Perú para la reactivación de los Campos Marginales, PETROBRAS ENERGÍA PERU, S. A. (PEPSA), suscribió un Contrato de Licencia para la Exploración y Explotación de Hidrocarburos en el Lote X. Este contrato contempla la perforación, operación y reactivación de pozos; la construcción, ampliación, reactivación, adecuación y mejora de las instalaciones de superficie que permitan un adecuado manejo de los fluidos producidos.

El Contrato de Licencia para la Exploración y Explotación de Hidrocarburos en el Lote X comprende la operación de 5000 pozos, la perforación de 22 pozos, el reacondicionamiento de 108 pozos, la rehabilitación de 60 pozos y la implementación de un proyecto de inyección de agua. En el 2008, PEPSA mantenía una producción fiscalizada de 12.846 bpd¹ de crudo y 11,221 mmscfd² de gas.

Desde el inicio de las operaciones de explotación y producción de petróleo en el Lote X, el petróleo producido ha sido recolectado y desgasificado en las baterías existentes en el área; el crudo es enviado a los sistemas de fiscalización y almacenamiento de crudo de Perupetro S.A para su refinación o venta. El gas producido se destina para los servicios de inyección, levantamiento artificial (*plunger lift*³) y gas a ventas.

La zona denominada Laguna y Zapotal cuenta con 8 pozos productores de gas no asociado, los cuales en periodos de alta demanda de gas se incorporan directamente al sistema de gas a venta. Estos pozos trabajan con la modalidad de desfogue en forma intermitente dado que la presión declina rápidamente hasta alcanzar la presión límite del sistema de 400 psig es necesario cerrar los pozos y abrirlos posteriormente después de unas horas. La presión de los pozos varía entre 400 y 800 psig y producen un caudal total de 1.75 mmscfd.

Con la finalidad de mejorar la recolección de gas, para venta; e inyección de gas, para remover remantes de petróleo (recuperación secundaria); en el sector adyacente a Batería Zapotal 04 (ZA-04) se instaló: una estación de compresión de gas (EZA-04), una línea de distribución principal de gas de 2" por 3,00 km, dos (02) *manifolds* de campo para inyección de gas y ocho (08) líneas de distribución a pozos inyectoras. La nueva estación de compresión tiene una capacidad instalada de 5,0 mmscfd; presión de succión, 50 psig; y presión de descarga, 3000 psig.

1.3. Justificación

De acuerdo al plan de producción de hidrocarburos PEPSA, se adecuaron las instalaciones de manejo y compresión de gas, ubicadas en el Lote X; con la finalidad de mantener la confiabilidad en los sistemas de inyección de gas, gas a *plunger lift* y crear facilidades para el manejo y supervisión de las instalaciones.

Además, de todo lo anteriormente mencionado, se prevé el cumplimiento de las normativas de Seguridad, Higiene y Protección Ambiental Intrínseca de la producción de hidrocarburos requerida por los estándares nacionales y la regulación legal aplicable.

Como parte del plan de reactivación y desarrollo para el manejo de la producción del Lote X, se puso en marcha Proyectos para la Inyección de Gas en el Lote X.

Motivado a esta nueva estrategia, se decidió construir las instalaciones necesarias para implementar el Sistema de Inyección de Gas, conformada por: facilidades de recolección de gas, instalación de equipos a presión, planta compresora de gas

¹ bpd: barriles por día.

² mmscfd: millones de pies cúbicos por día.

³ *Plunger Lift*: sistema de extracción de petróleo.

Zapotal 04 (EZA-04), facilidades de inyección y otras facilidades, a fin de garantizar el manejo eficiente del volumen de gas esperado en el corto y mediano plazo.

De acuerdo a la metodología planteada para el presente caso de estudio en Laguna Zapotal, y considerando las condiciones de operación de los equipos e infraestructura requerida, se ha definido instalar la siguiente infraestructura:

- Compresores de gas (C-1 y C-2); marca, GEMINI; modelo, D504; tipo, reciprocante separable; capacidad nominal, 2,37 mmscfd; presión de succión, 50 psig y presión a la descarga, 3000 psig. Accionado por motor de combustión interna a gas; marca, CATERPILLAR; modelo, G3508.
- Depurador de gas de entrada (V-01); tipo vertical, 24" O.D x 7'- 6" S/S⁴; capacidad, 5,0 mmscfd de gas y 27 bpd de líquidos.
- Filtro depurador de gas combustible (V-02); tipo vertical, 6" O.D x 4'- 9" S/S; capacidad, 0,40 mmscfd de gas y 0,1 bpd de líquidos.
- Filtro depurador de gas a instrumentos (V-03); tipo vertical, 6" O.D x 4'- 9" S/S; capacidad, 0,40 mmncfd de gas y 0,1 bpd de líquidos.
- Pulmón de gas de arranque (V-04); tipo horizontal; doble botella, de 20" O.D x 15'-10" S/S y capacidad de 70 ft³.
- Cabezales de succión y descarga; tuberías de interconexión entre equipos y facilidades en planta para la distribución de gas a inyección.
- Dos *manifolds* de campo para gas de inyección (M-1 y M-2), cada uno con cuatro puestos.
- Línea principal de distribución de gas, diámetro 2" por 3,00 km; material, API 5L Gr. B, sch 160.
- Líneas de distribución a pozos inyectoras de gas, diámetro 2"; material, API 5L Gr. B, sch 160.

1.4. Códigos, Normas y Especificaciones

El desarrollo del presente trabajo se ha realizado de acuerdo con las últimas ediciones de las secciones aplicables a los Códigos y Normas establecidos como: Reglamento Nacional de Construcciones, Código Eléctrico del Perú, Ley General de Hidrocarburos, Reglamento de las Actividades de Explotación y Exploración de Hidrocarburos DS-032-2004-EM, Reglamento para la Protección Ambiental en las Actividades de Hidrocarburos D.S. 039-2014-EM, especificaciones y disposiciones de reglamentos nacionales e internacionales vigentes, así mismo el uso de los estándares acordados.

La clasificación es la siguiente:

PETROBRAS Guías y procedimientos

AGA *American Gas Association.*

⁴ S/S: sean – sean, distancia entre cordones de soldadura

ANSI	<i>American National Standards Institute.</i>
API	<i>American Petroleum institute.</i>
ASTM	<i>American Society for Testing Materials.</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers.</i>
GPSA	<i>Gas Processors Suppliers Association.</i>
ISA	<i>Instrument Society of America.</i>
NEC	<i>National Electric Code.</i>
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association.</i>

Capítulo 2

Metodología del sistema de inyección

2.1. Técnicas de inyección

Entre las técnicas de inyección para remover remanentes de petróleo tenemos:

2.1.1. El Sistema *Plunger Lift*

El sistema de extracción *Plunger Lift* es un sistema ampliamente utilizado en la extracción de líquidos acumulados en pozos productores de gas y condensado que producen por debajo de su caudal crítico. Esta condición se alcanza cuando la velocidad del gas en el *tubing* no es suficientemente elevada para arrastrar las partículas líquidas que consecuentemente terminan acumulándose en el fondo del pozo (proceso denominado *Load up*) si esta situación no se corrige a tiempo, inevitablemente se alcanzará el ahogue definitivo del pozo.

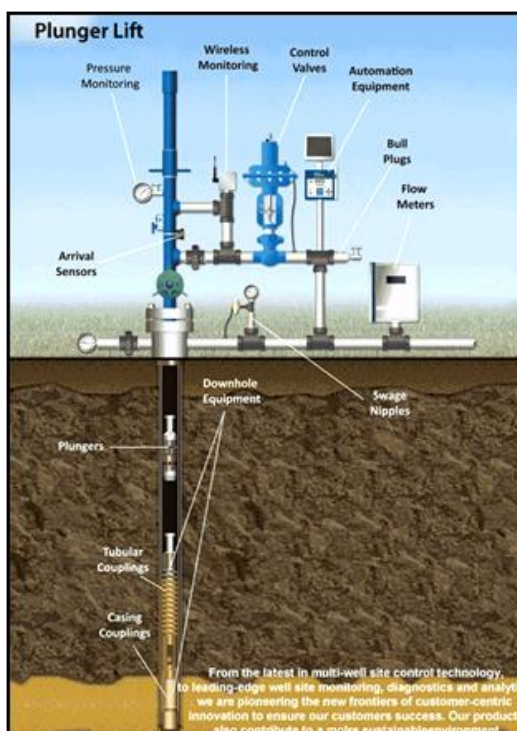


Figura 1. Sistema "*Plunger Lift*"

Fuente: Revista de petróleo y gas, 2008

2.1.2. Sistema de Inyección de Agua

Al perforar un pozo en un yacimiento petrolífero y se coloca el mismo en producción, se crea una zona de baja presión que permite a los fluidos moverse desde el yacimiento al pozo. En recuperación primaria el petróleo fluye debido a la energía propia del reservorio.

Cuando esta energía natural disminuye, se puede recurrir a otro método de recuperación obteniendo así una cantidad adicional de petróleo. Si por cualquier mecanismo se le entrega energía a un reservorio, se dice que la producción es por recuperación asistida (secundaria y terciaria)

El barrido con agua (*waterflooding*) es un método para remover remanentes de petróleo (recuperación secundaria) en el cual ésta es inyectada en uno o más pozos, formando un frente que desplaza el petróleo a través de la formación hacia los pozos productores. La inyección de agua produce la energía suficiente para desplazar el petróleo de la vecindad de los pozos inyectoros hacia los pozos productores. Este es el más difundido de los métodos de recuperación asistida por su bajo costo y alta eficiencia.

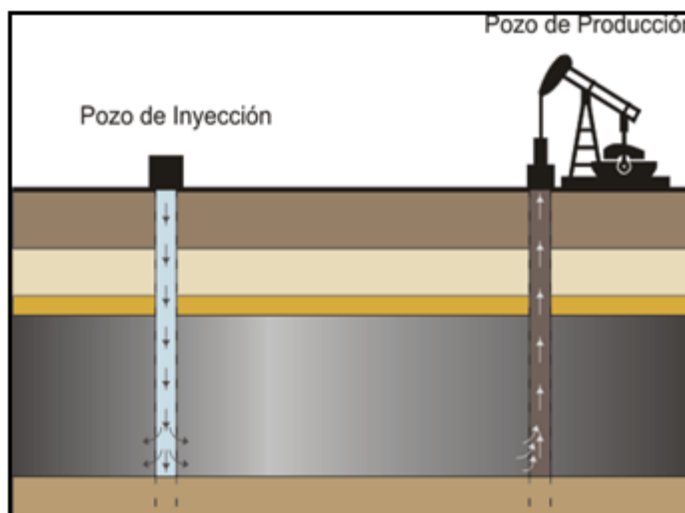


Figura 2. Esquema de recuperación secundaria.
Fuente: Revista de petróleo y gas, 2008.

2.1.3. Sistema de Inyección de Gas

La inyección de gas es otro de los métodos para remover remanentes de petróleo en el cual se inyecta gas en uno o más pozos para presurizar el reservorio y conseguir el desplazamiento del hidrocarburo hacia los pozos productores. La inyección de gas produce la energía suficiente para presurizar el yacimiento de pozos de baja producción y que se encuentran en la cercanía de los pozos inyectoros. Es importante mencionar que los pozos inyectoros resultan de la conversión de pozos productores en estado de abandono y/o cerrados por baja producción, para tal fin se deben realizar trabajos en los cabezales y facilidades que forman parte de la estructura del pozo. Este método es el caso de estudio del presente trabajo de tesis

denominada dimensionamiento de sistema para inyección de gas a alta presión para remover remanentes de petróleo.

2.2. Procedimiento de cálculo

El procedimiento de cálculo para el dimensionamiento del sistema de inyección de gas permitirá dimensionar el cabezal de recolección de gas, estación de compresión constituida por un conjunto de equipos y recipientes que permitirán completar adecuadamente el proceso de compresión de gas y *manifolds* de inyección. La estación de compresión está conformada por un depurador de entrada, que retire cualquier líquido que pueda condensar en la línea; un sistema de filtros para gas combustible y de instrumentos; y un sistema de gas de arranque. A continuación se detallan las premisas y el proceso de cálculo para las líneas de proceso y recipientes a presión.

2.2.1. Líneas de Proceso

2.2.1.1. Premisas

Para el cálculo de las líneas de agua, crudo y gas se tomaron en cuenta las siguientes premisas:

- Se trabajará con unidades del sistema inglés⁵.
- Máximos caudales y valores de presión.
- Capacidad para el manejo de agua, crudo y gas de los equipos.
- Diámetro de bocas de entrada y salidas de los equipos.
- Composición del gas, ver Anexo A. Tabla A1.
- Temperatura y presión de operación.
- Densidad del gas: $\frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$

$$\rho_g = \frac{P \times PM}{R \times T \times Z} \quad (\text{Ec. 2.01})$$

Donde:

P: Presión de gas, psia

PM: Peso molecular del gas

R: Constante de gases, $R = 10.73 \frac{\text{psia} \times \text{ft}^3}{\text{R lb mol}}$

T: Temperatura, °R

Z: Factor de compresibilidad

- Flujo másico de gas, $\frac{\text{lb}}{\text{s}}$

⁵ Es el sistema utilizado en la industria petrolera.

$$M_G = \frac{Q \times 10^6 \times PM}{379 \times 24 \times 3600} \quad (\text{Ec. 2.02})$$

Donde:

Q: Caudal del gas, mmscfd

PM: Peso molecular del gas

- Flujo de gas, $\frac{\text{ft}^3}{\text{s}}$

$$Q_g = \frac{M_G}{\rho_g} \quad (\text{Ec. 2.03})$$

Donde:

M_G : Flujo másico de gas

ρ_g : Densidad del gas

- Diámetro de la línea, ft

$$D = \sqrt{\frac{4 \times Q_g}{\pi \times V}} \quad (\text{Ec. 2.04})$$

Donde:

Q_g : Flujo de gas

V: Velocidad del gas, $\frac{\text{ft}}{\text{s}}$

- Velocidad (para el diámetro preseleccionado), $\frac{\text{ft}}{\text{s}}$

$$V_D = \frac{4QM_G}{\rho \times \pi \times D^2} \quad (\text{Ec. 2.05})$$

Donde:

M_G : Flujo másico de gas, $\frac{\text{lb}}{\text{s}}$

ρ : Densidad del gas, $\frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$

D: Diámetro, ft

- Presión al final del tramo, psia

$$P_2 = P_1 - \Delta P_{100} \times L \quad (\text{Ec. 2.06})$$

Donde:

P_1 : Presión de entrada, psia

ΔP_{100} : Caída de Presión por cada 100 ft, $\frac{\text{psig}}{\text{ft}}$

L: Longitud del tramo a calcular, ft

2.2.1.2. Metodología de diseño

Para determinar la caída de presión en tramos cortos de tuberías que transportan gas, dentro de instalaciones o límites de batería, se puede emplear una fórmula simplificada para fluidos compresibles, adecuada para flujo totalmente turbulento, asumiendo que la caída de presión en la línea no es una fracción significativa de la presión total (< 10%).

El siguiente método es una simplificación de la ecuación de *Darcy*, donde se elimina el cálculo del factor de fricción de *Moody*. La ecuación de *Darcy* puede ser expresada de una manera sencilla como:

$$\Delta P_{100} = \frac{W^2}{\rho} \times (0.000336 \times \frac{f_m}{d^5}) \quad (\text{Ec. 2.07})$$

Donde:

d: Diámetro interno promedio en la tubería, ft

W: Flujo másico, $\frac{\text{lb}}{\text{hr}}$

ρ : Densidad del fluido, $\frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$

f_m : Factor de fricción de *Moody*

Al simplificar, $C_1 = W^2 \times 10^{-9}$ y $C_2 = 366000 \times \frac{f_m}{d^5}$, se tiene:

$$\Delta P_{100} = \frac{C_1 \times C_2}{\rho} \quad (\text{Ec. 2.08})$$

Donde:

$$C_1 = \frac{\Delta P_{100} \times \rho}{C_2}, \text{ factor de descarga y}$$

$$C_2 = \frac{\Delta P_{100} \times \rho}{C_1}, \text{ factor de tamaño}$$

Los valores de C1 y C2 se toman de las Figuras 17-8 y 17-9 de la *Engineering Data Book - GPSA*⁶. Ver Anexo B. Figuras B1 y B2 respectivamente. (*Gas Processors Suppliers Association: GPSA*).

C2, incorpora el factor de fricción, asumiendo una tubería de acero al carbono totalmente nueva. Para el diseño de tuberías se requiere suponer el ΔP_{100} requerido y obtener el valor de C2, con el flujo a manejar. Para un flujo y diámetro de tubería conocidos ΔP_{100} puede ser calculado directamente.

Los criterios de diseño para líneas de proceso que transportan gas se basan en consideraciones por ruido y caídas de presión. Es recomendación del API RP 14E establecer como velocidad máxima en líneas de manejo de gas el valor de 60 ft/s. Los valores de caídas de presión recomendadas en tuberías para gas natural son las que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Caídas de Presión. Líneas de Gas Natural

Servicio	Caída de Presión ($\frac{\Delta \text{psi}}{100 \text{ ft}}$)
Líneas de Transferencia	0,5 – 2,0
Compresor (Succión)	
0 – 10 PSIG	0,05 – 0,125
10 – 50 PSIG	0,125
50 – 100 PSIG	0,25
> 200 PSIG	0,50
Compresor (Descarga)	
< 50 PSIG	0,125 – 0,25
50 – 100 PSIG	0,25 – 0,50
> 200 PSIG	0,5 – 1,0

Fuente: API RP 14E, 15th Ed., 1991.

Elaboración: Joel Távora.

Para las líneas de vapor o gas la velocidad del fluido no debe superar en ningún caso la velocidad máxima de erosión, puesto que la presencia de gotas de líquido puede causar serios daños en tuberías, especialmente en derivaciones y codos. El valor máximo para caudales continuos será el 90% de la velocidad de erosión calculada por el método API RP 14E:

$$V_e = \frac{C}{R_m} \quad (\text{Ec. 2.09})$$

Donde:

V_e : Velocidad de erosión, $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

R_m : Densidad del fluido (gas/líquido en condiciones de flujo, $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$)

⁶ GPSA: Gas Processors Suppliers Association.

C = Constante empírica (122 para servicio continuo con arena, 183 para servicio continuo sin arena). La constante C puede ser sustituida en la ecuación anterior por una constante modificada C_1 en función del tipo de materia: $C_1 = C \times A$

Tabla 2. Valor de la constante A

Constante	Valor (A)	Material
C_1	1,00	Para acero al carbono
C_1	1,33	Para acero inoxidable
C_1	1,57	Para acero dúplex

Fuente: API RP 14E, 15th Ed., 1991
 Elaboración: Joel Tavera.

La caída de presión en los accesorios de la línea (válvulas, codos, reducciones, etc.), depende del diámetro, y se calculan como longitudes equivalentes de tubería del mismo diámetro. Longitudes equivalentes de válvulas y accesorios para tuberías en el rango 1-1/2” a 60” se muestran en la figura 17-4 del *Engineering Data Book*. Ver Anexo C. Tabla C1.

2.2.1.3. Esquemático del proceso

La Figura 3 muestra un esquemático de la Estación de Compresión Laguna Zapotal, identificando las líneas para alimentar los compresores. En la Tabla 3 se identifican las líneas de gas, su longitud y accesorios.

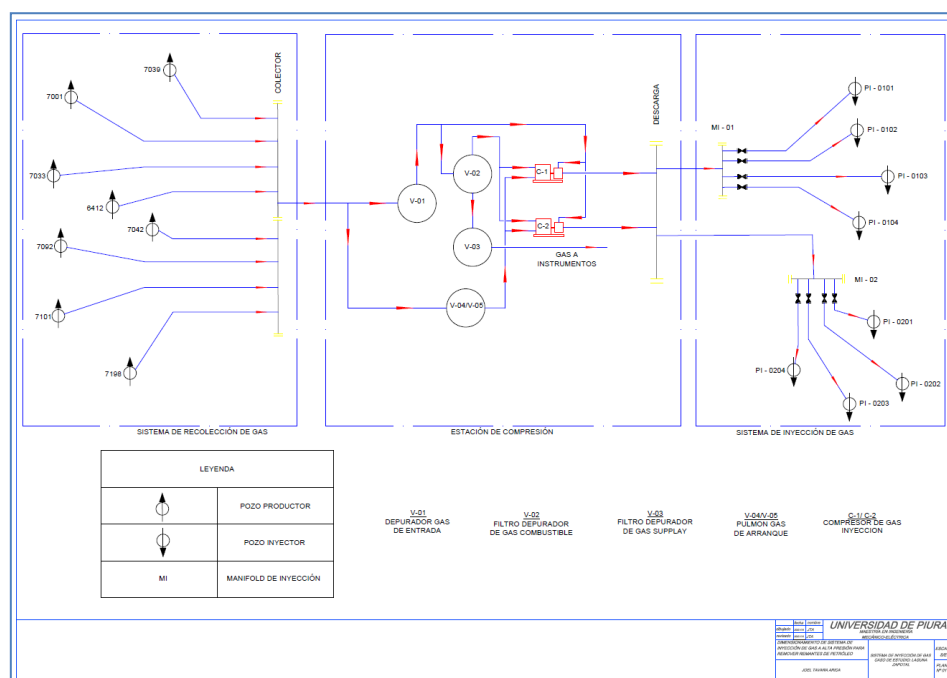


Figura 3. Esquemático del Proceso Laguna – Zapotal
 Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Líneas de la Estación Compresión Laguna Zapotal

Item	Tramo	Long. (ft)	Tee	Codo 45°	Codo 90°	Válvula
1	Cabezal Alimentación	13,12				
2	Alimentación Depurador V-01	43,00	1	2	2	2
3	Salida Depurador V-01	79,00	1	4	3	1
4	Múltiple Estación Compresora	16,40				
5	Múltiple EC a Regulador 50#	27,00	1	2	2	1
6	Regulador 50# a Compresor C1	3,30				1
7	Múltiple EC a Regulador	1,00				1
8	Regulador a Depurador GC V-02	59,00		4		2
9	Salida Depurador GC V-02	69,00	1	3	5	1
10	Múltiple GC	6,56				
11	Múltiple GC a Regulador 10#	46,00	1	2		1
12	Regulador 10# a Compresor C1	9,00			2	1
13	Descarga C1	46,00	1	2	2	1
14	Múltiple descarga Alta Presión	6,56				

Fuente: Elaboración propia.

2.2.2. Recipientes.

El dimensionamiento del sistema de inyección de gas contempla el diseño de una estación de compresión constituida por un conjunto de equipos y recipientes que permitirán completar adecuadamente el proceso de compresión de gas. Se requiere un depurador de entrada, que retire cualquier líquido que pueda condensar en la línea; un sistema de filtros para gas combustible y de instrumentos; y un sistema de gas de arranque. A continuación se detallan las premisas y el proceso de cálculo de dichos recipientes.

2.2.2.1. Premisas

Depuradores

Para el cálculo de los depuradores de entrada y de gas combustible, se tomaron en cuenta las siguientes premisas:

- Los cálculos fueron realizados de acuerdo con la metodología recomendada en el GPSA Sección 7, página 7-7.
- Composición del gas, saturada con agua, ver Anexo A. Tabla A1.
- Flujo de gas requerido como combustible para la operación de los motores de los compresores C-1 y C-2, indicado en la documentación del fabricante.
- Condensado de gas de °API 50 y gravedad específica: 0,780
- Temperatura de operación: 95 °F
- Presión de operación 60: psig
- Arrastre de líquido (condensado 50 °API): $0,1 \frac{\text{gal}}{\text{mmscfd}}$
- Gravedad API de la mezcla:

$$^{\circ}\text{API}_m = \frac{^{\circ}\text{API}_1 \times L_1 + ^{\circ}\text{API}_2 \times L_2 + ^{\circ}\text{API}_3 \times L_3}{q_t} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

Donde:

L_1 : Líquido circulante, $\frac{\text{bbl}}{\text{d}}$

L_2 : Arrastre de líquidos, $\frac{\text{bbl}}{\text{d}}$

L_3 : Arrastre de agua, $\frac{\text{bbl}}{\text{d}}$

q_t : Caudal de líquidos, $\frac{\text{bbl}}{\text{d}}$

- Gravedad específica de la mezcla líquida:

$$\text{Ge}_L = \frac{141,5}{131,5 + ^{\circ}\text{API}_m} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

- Densidad de la mezcla líquida:

$$\rho_L = \text{Ge}_L \times \rho_{\text{agua}} \quad (\text{Ec. 2.12})$$

Donde:

ρ_{agua} : $\frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$

- Densidad de la mezcla en la alimentación:

$$\rho_m = \frac{M_G \times \rho_g + M_L \times \rho_l}{M_G + M_L} \quad (\text{Ec. 2.13})$$

Donde:

M_G : Flujo másico de gas, $\frac{\text{lb}}{\text{d}}$

M_L : Flujo másico de líquido, $\frac{\text{lb}}{\text{d}}$

ρ_g : Densidad del gas, $\frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$

ρ_l : Densidad de la mezcla líquida, $\frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$

Filtros de gas combustible – Filtro de gas de instrumentos

Para el cálculo del filtro de gas combustible, se tomaron en cuenta las mismas premisas que para los depuradores. Las premisas adicionales y/o con diferencias son:

- Eficiencia del 99.99 % en la remoción de gotas de 0.3 a 0.6 micrones con un máximo de arrastre de líquidos de 0.001 ppm, ofrecida por los fabricantes.
- Flujo de gas combustible requerido para la operación de la sección motora de los compresores C-1 y C-2.
- Presión de operación: 57 psig.
- Con el objeto de estandarización de equipos y disminución de costos de mantenimiento y repuestos, se dimensionará el equipo de mayor carga y se utilizará en todas las aplicaciones.

Almacenamiento para gas de arranque.

Para el cálculo del recipiente requerido para almacenar el gas de arranque del motor de los compresores, se tomaron en cuenta las siguientes premisas:

- Los cálculos fueron realizados de acuerdo con la metodología recomendada por el fabricante del motor (Caterpillar G3508).
- Composición del Gas, saturada con agua, ver Anexo A. Tabla A1.
- Presión requerida en el motor de arranque del compresor entre 90 y 150 psig.
- Temperatura de operación: 95 °F.
- Presión de operación: 200 psig.
- Gas depurado en el depurador de gas de entrada V-01.

2.2.2.2. Metodología de cálculo para depuradores - filtros

Como ecuación de cálculo para la velocidad terminal del fluido dentro de un separador se utiliza la recomendada por el GPSA Sección 7, página 7-7.

$$V_t = K \sqrt{\frac{(\rho_l - \rho_g)}{\rho_g}} \quad (\text{Ec. 2.14})$$

Para relacionar el diámetro del recipiente con la velocidad que alcanzan vapores o gases de salida del separador sin causar un arrastre de líquidos, se emplea la ecuación desarrollada por *Sounders y Brown*.

$$G_m = C \sqrt{\rho \times g(\rho_l - \rho_g)} \quad (\text{Ec. 2.15})$$

Donde:

V_t = Velocidad crítica o terminal del gas, $\frac{\text{ft}}{\text{s}}$

G_m = Máxima velocidad másica del gas, $\frac{\text{lb}}{\text{hr} \times \text{ft}^2}$

ρ_l = Densidad del líquido, $\frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$

ρ_g = Densidad del gas, $\frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$

K y C = Constantes para dimensionamiento de separadores con extractores tipo neblina, ver Anexo D. Tabla D1.

Para el cálculo del área transversal del recipiente requerida para el gas, se emplea la ecuación:

$$A = \frac{Q_g}{V_t} \quad (\text{Ec. 2.16})$$

Donde:

Q_g : Flujo de gas, $\frac{\text{ft}^3}{\text{s}}$

V_t : Velocidad crítica o terminal del gas, $\frac{\text{ft}}{\text{s}}$

El flujo de gas (Q_g) a las condiciones del proceso se determina por:

$$Q_g = \frac{M_G}{\rho_g} \quad (\text{Ec. 2.03})$$

Donde:

M_G : Flujo másico de gas (T y P @ condiciones de operación), $\frac{\text{lb}}{\text{s}}$

ρ_g : Densidad del gas (T y P @ condiciones de operación), $\frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$

Para el cálculo del diámetro requerido empleamos la ecuación:

$$D = \sqrt{4 \times \frac{A}{\pi}} \quad (\text{Ec. 2.17})$$

Donde:

D = Diámetro requerido por el recipiente, ft

A = Área transversal del recipiente, ft²

Para calcular la altura de recipiente requerida para separar las gotas de líquido del gas AG, se emplea la siguiente ecuación.

$$A_G = 4 \times \frac{Q_g}{(\pi \times V_t \times D)} \quad (\text{Ec. 2.18})$$

Donde:

Q_g: Flujo de gas, $\frac{\text{ft}^3}{\text{s}}$

V_t = Velocidad crítica o terminal del gas, $\frac{\text{ft}}{\text{s}}$

D = Diámetro requerido por el recipiente, ft

Según lo indicado en la norma API 12J, el tiempo de retención del líquido en el recipiente será ajustado de acuerdo a la gravedad específica del líquido manejado. Ver Anexo E. Tabla E1.

La determinación de la altura requerida del recipiente para satisfacer el tiempo de residencia del líquido se calcula mediante:

$$V_L = q_T \times \frac{t}{1400} \quad (\text{Ec. 2.19})$$

$$A_L = 22,46 \times \frac{V_L}{\pi \times D^2} \quad (\text{Ec. 2.20})$$

Donde:

V_L = Sección de líquido requerida por el separador, bbl

t = Tiempo de residencia, min.

q_T = Líquido circulante, $\frac{\text{bbl}}{\text{d}}$

A_L = Altura requerida, ft.

D = Diámetro del separador, ft

La altura total del recipiente será la suma de las alturas requeridas para la sección de gas (A_G) y la requerida para el tiempo de residencia del líquido (A_L).

Altura Mínima requerida por el recipiente se tiene:

$$L_M = A_L + A_G \quad (\text{Ec. 2.21})$$

Donde:

A_G : Altura requerida para gas, ft

A_L : Altura requerida para líquido, ft

L_M : Altura mínima del recipiente, ft

La longitud entre las costuras de los cabezales (tangente/tangente) tendrán una relación respecto al diámetro:

$$\frac{L}{D} \text{ de } 2:1 \text{ a } 4:1$$

El Flujo másico de gas M_G , ($\frac{lb}{s}$) a condiciones de presión y Temperatura de operación se calcula con:

$$M_G = \frac{Q \times 10^6 \times PM}{379 \times 24 \times 3600} \quad (\text{Ec. 2.02})$$

Donde:

Q: Flujo promedio de gas, mmscfd

PM: Peso molecular del gas

El flujo másico de líquidos M_L ($\frac{lb}{d}$) a condiciones de presión y temperatura de operación se calcula con:

$$M_L = q_L \times \rho_l \quad (\text{Ec. 2.22})$$

Donde:

q_L : Flujo promedio de líquido, $\frac{bbl}{d}$

ρ_l : Densidad del líquido, $\frac{lb}{ft^3}$

La densidad del gas, ($\frac{lb}{ft^3}$) a condiciones de presión y temperatura de operación se calcula con:

$$\rho_g = \frac{P \times PM}{R \times T \times Z} \quad (\text{Ec.2.01})$$

Donde:

P: Presión de operación en el recipiente, psia

T: Temperatura de operación en el recipiente, °R

PM: Peso molecular del gas

R: Constante de gases= $10,73 \frac{\text{psia} \times \text{ft}^3}{\text{lbmol} \times \text{R}}$

Z: Factor de compresibilidad de gases.

El flujo de líquido Q_l a las condiciones de proceso se determina por:

$$Q_l = \frac{M_L}{\rho_l} \quad (\text{Ec. 2.23})$$

Donde:

M_L : Flujo másico de líquido, $\frac{\text{lb}}{\text{s}}$

ρ_l : Densidad del líquido, $\frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$

Para el cálculo del diámetro (pies) de las boquillas de alimentación, salida de gas y salida de líquido se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$D_{NX} = \sqrt{\frac{4 \times Q_t}{\pi \times V_{NF}}} \quad (\text{Ec. 2.24})$$

Donde:

Q_t : Caudal total de la corriente, $\frac{\text{ft}^3}{\text{s}}$

V_{NF} : Velocidad de la corriente de fluido, $\frac{\text{ft}}{\text{s}}$

El caudal se calcula a partir del flujo másico de cada una de las fases presentes en la corriente.

$$Q_t = \frac{(M_G + M_L)}{\rho_m} \quad (\text{Ec.2.25})$$

Donde:

M_G : Flujo másico de gas, $\frac{\text{lb}}{\text{d}}$

M_L : Flujo másico de líquido, $\frac{\text{lb}}{\text{d}}$

ρ_m : Densidad de la mezcla, $\frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$

Con la finalidad de tener un régimen de flujo adecuado a la entrada de un recipiente, para el cálculo de la velocidad de alimentación se utiliza la relación:

$$V_{NF} = \frac{50}{\sqrt{\rho_m}} \quad (\text{Ec.2.26})$$

Con la finalidad de tener un régimen de flujo adecuado a la salida de gas de un recipiente, para el cálculo de la velocidad se utiliza la relación:

$$V_{NG} = \frac{60}{\sqrt{\rho_g}} \quad (\text{Ec.2.27})$$

Con la finalidad de tener un régimen de flujo adecuado a la salida de líquidos de un recipiente, la velocidad máxima se fija en $3,3 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$.

2.2.2.3. Metodología de cálculo para almacenamiento de gas para arranque.

Al igual que cualquier otra máquina, el motor que accionará el compresor de la estación requiere de un sistema de encendido o arranque. Este puede efectuarse de acuerdo con dos principios:

- a) Mediante arranque eléctrico, utilizando un conjunto de baterías para generar el impulso necesario.
- b) Mediante arranque por fluido gaseoso, utilizando recipientes para almacenar aire o gas para generar el impulso necesario.

Cada sistema tiene sus ventajas y desventajas, afectadas por la cercanía de la instalación y la disponibilidad de acceder a servicios y repuestos.

En la estación de compresión, se estila la instalación de un sistema de arranque mediante fluido gaseoso, por lo que se debe calcular el volumen y presión de gas requeridos para el arranque, y dimensionar el recipiente que permita almacenarlo.

Un sistema de arranque por gas, manual o automático es muy confiable. Generalmente ofrece velocidades de arranque superiores a las ofrecidas por el sistema de arranque eléctrico, lo que resulta en arranques más rápidos; sin embargo, el sistema de control remoto y automatización para este tipo de arranque es más complejo. Por otra parte, el sistema de arranque por gas puede ser recargado fácilmente. Los recipientes de almacenamiento de gas son susceptibles a la condensación de líquidos por lo que deben protegerse contra la corrosión.

Las líneas de gas de arranque deben ser cortas, directas y al menos del mismo diámetro que la boquilla del motor. Deben estar soportadas para evitar tensiones el conjunto motor-compresor. Se recomienda utilizar conexiones flexibles entre el motor y las tuberías.

La torsión disponible por el gas acelera la máquina al doble de la velocidad de arranque en la mitad del tiempo que los sistemas eléctricos.

La presión del sistema de arranque debe regularse entre 90 y 100 psig, utilizando mayores presiones para mejorar el arranque bajo condiciones adversas. Para máquinas de entre 50 y 1600 hp se requieren por lo general entre 5 y $15 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}$ de gas⁷.

Tiempo de impulso para el arranque

El tiempo de impulso para el arranque en cada intento, depende del modelo de la máquina, su condición, la temperatura del medio ambiente, la viscosidad del aceite, el tipo de combustible y la velocidad de arranque de diseño. Generalmente, para una máquina a $26,7^\circ\text{C}$ (80°F) se requieren entre cinco (05) y siete (07) segundos. El arranque de una máquina

⁷ Valores recomendados por el fabricante del compresor.

caliente requiere menos de dos (02) segundos. En la Tabla 4 se muestran los requerimientos de gas del motor G3508 a tres diferentes presiones de arranque.

Tabla 4. Requerimiento de gas de arranque a diferentes presiones

Consumo de Gas de Arranque (ft ³ /s)	Presión de Gas en el Motor de Arranque (psia)			Mín. Presión en Tanque (psia)
	115	140	165	
	9.3	10.8	12.6	45

Fuente: Fabricante Motor Caterpillar

Elaboración: Joel Tavera.

Dimensionamiento del tanque

Muchas aplicaciones requieren que los tanques de almacenamiento de gas para arranque permitan realizar un determinado número de intentos de arranques sin realizar la recarga del sistema. Los tanques deben cumplir las especificaciones ASME y estar equipados con válvulas e instrumentos de seguridad. La dimensión del tanque se puede calcular utilizando la siguiente ecuación:

$$V_t = \frac{V_s \times T \times P_a}{(P_t - P_{\min})} \quad (\text{Ec. 2.28})$$

Donde:

V_t : Capacidad de almacenamiento del tanque, ft³

V_s : Consumo de gas del motor de arranque, $\frac{\text{ft}^3}{\text{s}}$

T: Tiempo de arranque requerido, s

P_a : Presión atmosférica, 14,7 psig

P_t : Presión de gas en el tanque al inicio del arranque, psig

P_{\min} : Presión mínima en el tanque para sostener el arranque a 100 rpm, 90 psig.

El tiempo de arranque se calcula dependiendo del número de intentos de arranque previstos. Se utilizan siete segundos para el primero y dos segundos para cada intento sucesivo⁸.

$$T = 7 + (n - 1) \times 2 \quad (\text{Ec. 2.29})$$

Donde:

n: Número de intentos de arranque.

El diseño del recipiente se debe hacer buscando disminuir el área superficial ocupada en la planta. Para ello se pueden seleccionar varios

⁸ Recomendación por el fabricante del motor.

arreglos de recipientes. Un arreglo común es la colocación de tubos horizontales uno sobre el otro, unidos por uno ó más tubos verticales.

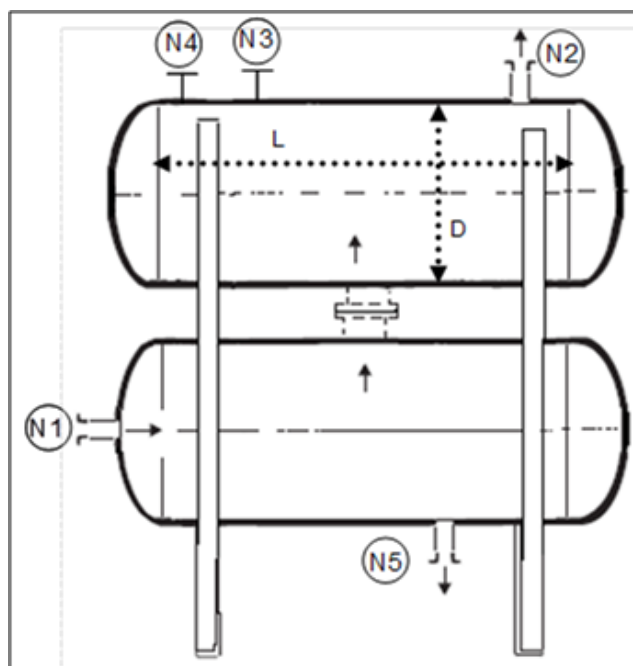


Figura 4. Esquema de pulmón de arranque
Fuente: *Data Engineering Book, 12th Ed, 2004 - GPSA*

2.2.3. Estación de compresión

2.2.3.1. Criterios de diseño

Capacidad

Estación Compresora para una capacidad de manejo de 5,0 mmscfd de gas.

Arreglo de tuberías

El arreglo de las tuberías de alimentación a estación, cabezal de alimentación, líneas de alimentación a compresores, cabezales de succión/descarga, cabezales de salida, con relación a la estación.

Sistema de compresión

- Número de compresores activos C-1 y C-2. Simultáneamente en operación.
- Flujo volumétrico actual de gas: 5,0 mmscfd.
- Compresor C-1, capacidad nominal 2,37 mmscfd, presión succión nominal 50 psig, presión descarga 3000 psig.
- Compresor C-2), capacidad nominal 2,37 mmscfd, presión succión nominal 50 psig, presión descarga 3000 psig.

- Temperatura de entrada: 95 °F @ 60 psig
- Temperatura de salida de gas: 120 °F @ 3000 psig

Condiciones del sitio

Tabla 5. Características Climáticas en Laguna Zapotal

Temperatura máxima en verano:	35°C (95° F)
Temperatura mínima en invierno:	10°C (50° F)
Dirección predominante del viento:	Noroeste
Velocidad normal del viento	5 km/h
Lluvia media anual	50 mm
Zona Sísmica:	Alta

Fuente: Petrobras Energía S.A.
Elaboración: Joel Tavera.

.Datos Físicos y Químicos

Tabla 6. Características del Gas en Laguna Zapotal

Componente	% Molar
Metano	0,9871
Etano	0,0040
Propano	0,0005
i-Butano	0,0001
n-Butano	0,0002
i-Pentano	0,0001
n-Pentano	0,0004
n-Hexano	0,0003
Nitrógeno	0,0038
CO ₂	0,0002
H ₂ S	-
Agua	0,0034
Total	1,0000
Peso molecular (lb/lb mol)	16,2300
Gravedad específica	0,5600
Poder calorífico	N/D

Fuente: Cromatografía Petrobras Energía S.A.
Elaboración: Joel Tavera.

Especificaciones de tuberías

- Ubicación: Aéreas y enterradas.
- Simulación: No isotérmica, estado estacionario.
- Temperatura Ambiente: 95 °F

- Rugosidad: 0,0018 pulgadas

Cargas de Diseño

La carga de diseño para las líneas de proceso corresponderá a los flujos volumétricos y niveles de presión previstos en EZA-04.

- Compresor C-1, flujo volumétrico actual, 2,37 mmscfd; presión de succión, 50 psig; y presión de descarga, 3000 psig.
- Compresor C-2, flujo volumétrico actual, 2,37 mmscfd; presión de succión, 50 psig; y presión de descarga, 3000 psig.

Criterios de Diseño

Los criterios de diseño para líneas de proceso que transportan gas se basan en consideraciones por ruido y caídas de presión. Es recomendación del API RP 14E establecer como velocidad máxima en líneas de manejo de gas un valor de 60 ft/s.

Para estimar la caída de presión en tramos cortos de tuberías que transportan gas, dentro de instalaciones o límites de baterías, se puede emplear una fórmula simplificada para fluidos compresibles adecuada para flujo totalmente turbulento, asumiendo que la caída de presión en la línea no es una fracción significativa de la presión total (< 10%).

2.2.4. Líneas de recolección

2.2.4.1. Criterios de diseño

Producción por Pozo

La producción actual de los pozos asociados a la recolección de la planta EZA-04, se encuentra alrededor de 1,75 mmscfd. En la Tabla 7 se especifica la producción por pozos con sus respectivas presiones de cabezal y línea así como el diámetro del reductor.

Tabla 7. Producción por pozo asociado a recolección de EZA-04

Pozo	Bean	Cabeza (psig)	Línea (psig)	mmscf
7039	1/4	850	440	0,230
7001	1/4	750	440	0,001
7198	1/4	500	80	0,130
7101	1/4	750	430	0,060
7042	16/64	610	440	0,680
7092	16/64	610	400	0,650
7033	1/4	900	450	0,001
6412	1/4	900	470	0,001

Fuente: Petrobras Energía S.A.
Elaboración: Joel Távora.

Arreglo de tuberías

El arreglo de la red de recolección a estación EZA-04 se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Arreglo de red de recolección a EZA-04.

Tramo	Descripción	Diámetro (in)	Longitud (m)	Caudal (mmscfd)
7033 – LR 4"	Desde el pozo 7033 hasta la línea de recolección de 4 pulg.	2	456	0,001
7001 – LR 4"	Desde el pozo 7101 hasta la línea de recolección de 4 pulg.	2	118	0,001
Tramo LR 4"	Desde el empalme del 7001 a la línea de recolección de 4 pulg. hasta el empalme a esta del pozo 6412	4	328	0,002
6412 – LR 4"	Desde el pozo 6412 hasta la línea de recolección de 4 pulg.	2	402	0,001
Tramo LR 4"	Desde el empalme del 6412 a la línea de recolección de 4 pulg. hasta el empalme a esta del pozo 7039	4	510	0,003
7039- LR 4"	Desde el pozo 7039 hasta la línea de recolección de 4 pulg.	2	761	0,230
Tramo LR 4"	Desde el empalme del 7039 a la línea de recolección de 4 pulg. hasta el empalme a esta del pozo 7042	4	549	0,233
7042 – LR 4"	Desde el pozo 7042 hasta la línea de recolección de 4 pulg.	2	100	0,680
7092 – LR 4"	Desde el pozo 7092 hasta la línea de recolección de 4 pulg.	2	200	0,650
4" a 8"	Desde la línea de recolección de 4 pulg. hasta la de 8".	4	5	1,563
Tramo LR 8"	Desde el empalme de 4" a la línea de 8" hasta el empalme a esta de la línea que viene de los pozos 7101 y 7198	8	924	1,563
7101 – 7198	Desde el pozo 7101 hasta el empalme a esta del pozo 7198.	2	1233	0,060
7198 – Línea 2"	Desde el pozo 7198 hasta la línea de recolección de 2 pulg. que proviene del pozo 7101.	2	91	0,130
7198 – LR 8"	Desde el empalme del pozo 7198 a la línea de 2" hasta el empalme a la de 8"	2	150	0,190
Tramo LR 10"	Tramo de 10" que va desde el empalme de 8" hasta reducir el diámetro nuevamente a 8"	10	1617	1,753
Tramo LR 10" – 8"	Tramo de 8" desde la reducción de 10 a 8" hasta el comienzo del tramo de 4"	8	357	1,753
Tramo LR 4"	Desde la reducción de 8 a 4" hasta el empalme con el gasoducto de gas a venta	4	3911	1,753

Fuente: Elaboración propia.

2.2.4.2. Esquemático de Flujo de Procesos

Ver Anexo H. Figura H1. Esquemático de líneas de recolección.

2.2.5. Líneas de inyección.

2.2.5.1. Criterios de diseño

Inyección por Pozo

Se debe asegurar inyectar a cada pozo 0,5 mmscfd, sin embargo se evaluó el sistema para una capacidad de cada compresor de 2,33 mmscfd, lo cual significa inyectar a cada pozo 0,583 mmscfd.

Arreglo de Tuberías

El arreglo de la red de inyección desde la estación EZA-04 hasta cada uno de los pozos inyectoros se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Arreglo de red de inyección asociada a EZA-04.

Tramo	Descripción	Diámetro (in)	Longitud (m)	Caudal (mmscfd)
Cab. Desc – Mult 1	Desde el cabezal de descarga del compresor hasta el Múltiple N° 1	2	30,0	2,330
Mult 1 - 7098	Desde el múltiple 1 hasta el cabezal del pozo inyector 7098	2	161,0	0,5825
Mult 1 – 6139	Desde el múltiple 1 hasta el cabezal del pozo inyector 6139	2	807,5	0,5825
Mult 1 - 5913	Desde el múltiple 1 hasta el cabezal del pozo inyector 5913	2	1087,2	0,5825
Mult 1 - 5961	Desde el múltiple 1 hasta el cabezal del pozo inyector 5961	2	1444,4	0,5825
Cab. Desc – Mult 2	Desde el cabezal de descarga del compresor hasta el Múltiple N° 2	2	2955,0	2,330
Mult 2 - 6103	Desde el múltiple 2 hasta el cabezal del pozo inyector 6103	2	50,0	0,5825
Mult 2 - 6252	Desde el múltiple 2 hasta el cabezal del pozo inyector 6252	2	547,7	0,5825
Mult 2 - 6264	Desde el múltiple 2 hasta el cabezal del pozo inyector 6264	2	489,0	0,5825
Mult 2 - 6538	Desde el múltiple 2 hasta el cabezal del pozo inyector 6538	2	789,0	0,5825

Fuente: Elaboración propia.

2.2.5.2. Esquemático de Flujo de Procesos

Ver Anexo H. Figura H2. Esquemático de líneas de inyección.

Capítulo 3

Caso de estudio

3.1. Descripción caso de estudio

3.1.1. Entrada a Planta.

Las facilidades de entrada está conformada por las líneas de recolección de 08 pozos productores da gas y un colector de Ø 8" que recibe la producción total de 5,0 mmscfd, dicha producción de gas alimenta al depurador de producción (V-01) mediante una tubería de Ø 8".

La presión del gas de entrada es regulada a 60 psig por un sistema redundante de válvulas reguladores de presión (PRV-002 y PRV-003) instaladas en paralelo en la línea de entrada. Este arreglo garantiza que la presión dentro de la estación no sobrepase las 60 psig. Posterior a la regulación se mide el flujo en el colector de Ø 8" mediante placa de orificio (FE-001) compensada con temperatura (TE-001) y con registro (FR-001) y lectura local. Aguas arriba a la placa, se monitorea la presión mediante manómetro (PI_002: 0-100 psig)

3.1.2. Separador de Producción (V-01).

La estación de compresión EZA-04 dispone de un depurador de producción (V-01), que opera a la temperatura de 95°F y una presión de 60 psig.

El separador de producción (V-01) tiene una capacidad de 22 bpd y 5 mmscfd. Recibe la producción total del campo, a través de la línea de Ø 8". Luego de realizar la separación gas-líquido, los líquidos se envían al sistema de drenaje que los conduce hacia la Batería Zapotal - 04 y el gas pasa al cabezal de la succión de la estación de compresión y para los servicios auxiliares de la misma.

El control de nivel en el separador de producción se realiza por medio de una válvula de control (LCV_001) del tipo diafragma balanceado con pesa externa, para mantener el nivel de líquido en el valor deseado en el separador de producción (6" desde la costura inferior del recipiente). El nivel de líquido se monitorea localmente por medio de indicador de nivel (LG_001), ubicado en el cuerpo del equipo. El líquido separado pasa al drenaje y se envía hacia la Batería Zapotal-04.

La presión se monitorea por medio de manómetro (PI_003: 0-100 psig) para supervisión local, ubicado en el cuerpo del equipo.

La temperatura se monitorea por medio del termómetro (TI_001: 0-250°F) para supervisión local, ubicado en el cuerpo del equipo.

Como medida de protección adicional al separador, este tiene instalada una válvula de seguridad y alivio (PSV_001) cuya presión de ajuste es 74 psig, ubicada en el cabezal superior del recipiente, la cual descarga por la línea de Ø 3" hacia el cabezal de venteo de baja presión de Ø 6".

3.1.3. Distribución del Gas.

El gas depurado en el separador de entrada (V-01), se envía hacia el cabezal de succión de los compresores por la línea de Ø 8", a la cual se monitorea la presión mediante el manómetro (PI_004: 0-100 psig) para supervisión local. Parte del gas (0,34 mmscfd) es tomada por la línea de Ø 4" para alimentar el filtro de gas combustible (V-02).

El cabezal de succión de los compresores tiene como medida de protección instalada una válvula (UV-002) que permite descargar el gas contenido en el cabezal hacia el cabezal de venteo de baja presión de Ø 6".

3.1.4. Filtro de Gas Combustible (V-02).

La función del filtro de gas combustible (V-02) es retener la mayor cantidad de líquido posible de esta corriente y así prevenir cualquier arrastre de líquido. La presión de depuración es de 57 psig, con temperaturas de entre 80 y 95 °F.

El filtro de gas combustible (V-02), recibe parte del gas depurado (0,34 mmscfd) en el separador de entrada (V-01), a través del cabezal de Ø 4". Luego de realizar la separación gas-líquido, los líquidos se envían al sistema de drenaje que los conducen hacia la Batería Zapotal - 04 y el gas va al sistema de gas de potencia de instrumentos (40 mscfd) mediante línea de Ø 2" y al sistema de gas combustible (0,30 mmscfd) mediante línea de Ø 4", hasta el cabezal de gas combustible de Ø 6", desde donde se envía a la parte motora de los compresores.

El control de nivel en el filtro de gas combustible se realiza por medio de una válvula de control (LCV_002) del tipo diafragma balanceado con pesa externa, para mantener el nivel de líquido, en el valor deseado (6" desde la costura inferior del recipiente), en el separador de producción. El nivel de líquido se monitorea localmente por medio de indicador de nivel (LG_002), ubicado en el cuerpo del equipo. El líquido (crudo) separado pasa al sistema de drenajes y se envía a la Batería Zapotal - 04.

La presión diferencial se monitorea por medio de manómetro (PDI_006: 0-100 psig) para supervisión local, ubicado entre la boquilla de entrada y en el cuerpo del equipo, este registro nos permitirá determinar la necesidad de reemplazo del elemento filtrante.

La temperatura se monitorea por medio del termómetro (TI_002: 0-250 °F) para supervisión local, ubicado en el cuerpo del equipo.

Como medida de protección adicional al filtro, se tiene instalada una válvula de seguridad y alivio (PSV_002) cuya presión de ajuste es 70 psig, ubicada en

el cabezal superior del recipiente, la cual descarga por una línea de Ø 2" hacia el cabezal de venteo de baja presión de Ø 6".

En el cabezal de gas combustible de Ø 6" se monitorea la presión mediante el manómetro (PI_009: 0-100 psig) para supervisión local.

Como medida de protección adicional, este cabezal tiene instalada una válvula (UV-003) que permite descargar el gas contenido en dicho cabezal hacia el cabezal de venteo de baja presión de Ø 6".

3.1.5. Filtro de Gas de Potencia para Instrumentos (V-03).

La función del filtro de gas de instrumentos (V-03) es retener la mayor cantidad de líquido posible de esta corriente y así prevenir cualquier arrastre de líquido hacia los instrumentos. La presión de depuración es de 55 psig, con temperaturas de entre 80 y 95 °F.

El filtro de gas de potencia para instrumentos (V-03), recibe parte del gas depurado (40 mscfd) en el filtro de gas combustible (V-02), a través de la línea Ø 2". Luego de realizar la separación gas-líquido, los líquidos se envían al sistema de drenaje que los conducen hacia la Batería Zapotal - 04 y el gas pasa al sistema de gas de potencia para instrumentos.

El control de nivel en el filtro de gas de potencia para instrumentos se realiza por medio de una válvula de control (LCV_003) del tipo diafragma balanceado con pesa externa, para mantener el nivel de líquido en el valor deseado en el separador de producción (6" desde la costura inferior del recipiente). El nivel de líquido se monitorea localmente por medio de indicador de nivel (LG_003), ubicado en el cuerpo del equipo. El líquido (crudo) separado pasa al sistema de drenaje se envía hacia la Batería Zapotal - 04.

El gas depurado va para el consumo del sistema de gas de potencia para instrumentos mediante la línea de Ø 2".

La presión diferencial se monitorea por medio de manómetro (PDI_008: 0-100 psig) para supervisión local, ubicado entre la boquilla de entrada y el cuerpo del equipo.

Como medida de protección adicional, tiene instalada una válvula de seguridad y alivio (PSV_003) cuya presión de ajuste es 68 psig, ubicada en el cabezal superior del recipiente, la cual descarga por una línea de Ø 2" hacia el cabezal de venteo de baja presión de Ø 6".

3.1.6. Área de Gas de Arranque.

El gas para arranque se toma del sistema de gas a ventas a través de línea de Ø 4". Este sistema está conformado por un recipiente de 62,88 ft³ de gas a 200 psig. Se recibe mediante la línea de Ø 2", la cual posee una válvula reguladora de presión (PRV-004) para llevar el gas a la presión de almacenamiento.

Para ejecutar un arranque, se debe alinear de forma manual el recipiente de almacenamiento de gas de arranque (V-04) con el compresor que se va a encender. Se presiona el interruptor de encendido, haciendo fluir gas hacia

el motor de arranque. De acuerdo con el fabricante, se requiere de siete (07) segundos de flujo de gas para hacer el arranque del compresor. Para intentos sucesivos, en caso de ser necesarios, solo requiere de dos (02) segundos de flujo de gas.

El gas se lleva del recipiente de almacenamiento hasta el cabezal de gas de arranque de Ø 6", utilizando la línea Ø 2". En este cabezal se monitorea la presión mediante el manómetro (PI_011: 0-400 psig) para supervisión local. Entrega el gas al arranque de los compresores C-1 y C-2 mediante la línea de Ø 2". Como medida de protección, el cabezal de gas de arranque, tiene instalada una válvula (UV-004) que permite descargar por una línea de Ø 6" hacia el cabezal de venteo de baja presión de Ø 6".

De formarse algún líquido en este recipiente (V-04), se puede enviar al sistema de drenaje y se envía hacia la Batería Zapotal - 04. Este drenaje se realiza en forma manual.

La presión se monitorea por medio de manómetro (PI_007: 0-400 psig) para supervisión local, ubicado en el cuerpo del equipo.

La temperatura se monitorea por medio del termómetro (TI_003: 0-250 °F) para supervisión local, ubicado en el cuerpo del equipo.

Como medida de protección adicional, el sistema de almacenamiento tiene instalada una válvula de seguridad y alivio (PSV_004) cuya presión de ajuste es 244 psig, ubicada en la parte superior del recipiente, la cual descarga por una línea de Ø 2" hacia el cabezal de venteo de Ø 6" de baja presión de la estación de compresión.

3.1.7. Área de Compresión.

El área de compresión está conformada actualmente por dos compresores (C-1 y C-2). Los compresores C-1 y C-2 operarán a una presión de succión de 50 psig y de descarga de 3000 psig. Este compresor es accionado por un motor de combustión interna a gas.

Succión del Compresor: C-1: El gas a comprimir viene del depurador de entrada de la estación (V-01). Es medido mediante placa de orificio con indicación local (FE-002), con compensación por temperatura (TE-002) y registro (FR-002) para lectura local, en la línea de Ø 8". La temperatura se monitorea localmente mediante un termómetro (TI-005: 0-250°F) instalado en la línea de Ø 8".

Gas Combustible: El gas combustible viene del cabezal correspondiente mediante la línea de Ø 2". Es medido mediante placa de orificio (FE-003) con compensación por temperatura (TE-003) y registro (FR-003) para lectura local. La presión de succión se regula a 10 psig, antes de ingresar al sistema del motor de los compresores mediante la válvula (PRV-005). Es monitoreada localmente por medio del manómetro (PI-010: 0-30 psig).

Gas de Arranque: El gas de arranque viene del cabezal correspondiente mediante línea de Ø 2". La presión es monitoreada localmente por medio del manómetro (PI-012: 0-400 psig).

Compresor: C-1 y C-2: El gas se comprime de 50 a 3000 psig utilizando un compresor *General Electric, modelo Gemini D504*, de cuatro (04) etapas, 1400 rpm y 531 bhp. Entre las etapas, el gas es enfriado y depurado, con facilidades que forman parte del compresor (enfriador y depurador). Posee, además, válvulas de sobre presión que descargan al sistema de venteo de alta presión de Ø 4”.

3.1.8. Múltiple de Alta Presión.

El gas comprimido, pasa al cabezal de alta presión de la estación Ø 4”, desde donde se envía a los múltiples de inyección en campo, saliendo a una presión de 3000 psig. El gas comprimido se distribuye a dos áreas de inyección, cada una con un múltiple con capacidad para cuatro pozos inyectoros. Estos múltiples están ubicados en el campo, uno a 30 metros de la estación de compresión y otro a 3 km de la estación. El sistema de distribución está diseñado de forma tal, que asegura una presión de 2950 psig en el cabezal de inyección del pozo más alejado.

Para ajustarse al crecimiento gradual del sistema de recuperación secundaria, y adaptarse al proceso de conversión de pozos (productores a inyectoros) y crecimiento de la estación de compresión, se posee un sistema de regulación de presión individual para cada múltiple, a la salida del múltiple de alta presión, que permite regular la presión de forma tal que se asegura una presión de 2000 psig en el pozo más alejado de cada múltiple de inyección.

3.2. Cálculos específicos

3.2.1. Líneas de proceso

3.2.1.1. Cabezal de alimentación

Se presenta a continuación el procedimiento de cálculo del cabezal de alimentación, indicado como tramo 1 en la Figura 3 y la Tabla 3 del capítulo 2.

El tramo 1 está constituido por 13,12 ft de línea.

Datos de entrada:

Presión: $P = 60,0 \text{ psig} = 74,7 \text{ psia}$

Temperatura: $T = 95,0 \text{ °F} = 555 \text{ °R}$

Peso molecular del gas: $PM = 16,23$

Gravedad específica del gas: $Ge = 0,560$

Factor de compresibilidad: $Z = 0,98$. Tomado del GPSA sección 23 Fig 23-5/6/7. Ver Anexo F. Figuras F1, F2 y F3.

Caudal de gas: $Q = 5,00 \text{ mmscfd}$

Constante de gases: $R = 10,73 \frac{\text{psia} \times \text{ft}^3}{\text{R lb mol}}$

Cálculos:

Densidad del gas: (Ec. 2.01)

$$\rho_g = \frac{P \times PM}{R \times T \times Z}$$

$$\rho_g = \frac{74.7 \text{ psia} \times 16.23}{(10.73 \text{ psia} \times \text{ft}^3 R \times T \times Z)}$$

$$\rho_g = \frac{74.7 \text{ psia} \times 16.23}{(10.73 \frac{\text{psia} \times \text{ft}^3}{R \times \text{lb} \times \text{mol}} \times 555 R \times 0,98)}$$

$$\rho_g = 0,208 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$$

Flujo másico de gas: (Ec. 2.02)

$$M_G = \frac{Q \times 10^6 \times PM}{379 \times 24 \times 3600}$$

$$M_G = \frac{5.00 \text{ mmscfd} \times 10^6 \times 16.23}{379 \times 24 \times 3600}$$

$$M_G = 2.478 \frac{\text{lb}}{\text{s}} = 8921.9 \frac{\text{lb}}{\text{h}}$$

Flujo de gas: (Ec. 2.03)

$$Q_g = \frac{M_G}{\rho_g}$$

$$Q_g = \frac{2.478 \frac{\text{lb}}{\text{s}}}{0.208 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}}$$

$$Q_g = 11,913 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}$$

Diámetro de la línea:

El diámetro de la línea depende del flujo de gas y su velocidad. Un aspecto a considerar, es la caída de presión por cada 100 pie de línea (ΔP_{100}), que debe estar en el rango de 0.05 a 0.125 psi/100 ft.

Para cumplir con el criterio de control de ruido en líneas de gas dentro de instalaciones, indicada en el documento API RP 14E, sección 2.4 *Sizing Criteria for Single-Phase Gas Lines*, se establece una velocidad de $60 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$, para calcular el diámetro mínimo requerido.

Haciendo uso de la ecuación Ec. 2.04 y $V = 60 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$

$$D = \sqrt{\frac{4 \times Q_g}{\pi \times V}} \quad (\text{Ec. 2.04})$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \times 11.913 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}}{\pi \times 60 \frac{\text{ft}}{\text{s}}}}$$

$$D = 0,503 \text{ ft}$$

En pulgadas

$$D = 0,503 \text{ pie} \times 12 \frac{\text{in}}{\text{ft}}$$

$$D = 6,034 \text{ in}$$

La tubería comercial cuyo diámetro nominal cumple con el valor determinado, es la tubería de $\emptyset 6'' \text{ sch std}$ ($D_i = 6.065''$)

Para utilizar la ecuación de Darcy modificada, se requiere determinar los valores de C_1 y C_2 . C_1 es función del flujo másico del gas y C_2 depende del diámetro de la tubería seleccionada.

Con $M = 8921.9 \frac{\text{lb}}{\text{h}}$, se determina C_1 en la Fig. 17-8 del GPSA. Ver Anexo B. Figura B1.

$$C_1 = 0,081$$

Con $D = 6'' \text{ sch std}$, se determina C_2 en la Fig. 17-9 del GPSA. Ver Anexo B. Figura B2.

$$C_2 = 0,610$$

Con el diámetro pre-seleccionado verificar la velocidad, para tal fin, hacer uso de la ecuación (Ec. 2.05)

$$V_D = \frac{4M}{\rho \times \pi \times D^2} \quad (\text{Ec. 2.05})$$

$$V_D = \frac{4 \times 2.478 \frac{\text{lb}}{\text{s}}}{0.208 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \times \pi \times \left(\frac{6.065}{12}\right)^2}$$

$$V_D = 59.381 \frac{\text{ft}}{\text{s}} \quad (\text{menor que } 60 \text{ ft/s})$$

Verificar caída de presión por cada 100 ft: (Ec. 2.07)

$$\Delta P_{100} = \frac{C_1 \times C_2}{\rho}$$

$$\Delta P_{100} = \frac{0,081 \times 0,610}{0,208 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}}$$

$$\Delta P_{100} = \frac{0,237 \text{ psi}}{100 \text{ ft}}$$

Este valor está fuera del rango requerido (0,05 – 0,125), por lo que se incrementa el diámetro y se repite el cálculo: el siguiente diámetro nominal, es de la tubería de $\emptyset 8'' sch std$ ($D_i = 7,981''$)

Con $D = 8'' sch std$, se determina C_2 en la Fig. 17-9 del GPSA. Ver Anexo B. Figura B2.

$$C_2 = 0,146$$

Con el diámetro pre-seleccionado verificar la velocidad, para tal fin, hacer uso de la ecuación (Ec. 20.05)

$$V_D = \frac{4 \times 2,478 \frac{\text{lb}}{\text{s}}}{0,208 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \times \pi \times \left(\frac{7,981}{12}\right)^2}$$

$$V_D = 34,29 \frac{\text{pie}}{\text{s}} \text{ (menor que } 60 \text{ ft/s)}$$

Verificar caída de presión por cada 100 ft: (Ec. 2.07)

$$\Delta P_{100} = \frac{C_1 \times C_2}{\rho}$$

$$\Delta P_{100} = \frac{0,081 \times 0,146}{0,208 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}}$$

$$\Delta P_{100} = \frac{0,057 \text{ psi}}{100 \text{ ft}}$$

Este valor está en el rango establecido. Por tratarse de un cabezal (aplica tanto para succión como para descarga) donde se desea obtener una distribución de fluido para cada componente conectado al mismo y una mínima caída de presión, se incrementa al siguiente diámetro.

El siguiente diámetro nominal, es de la tubería de $\emptyset 10'' sch std$.

$$(D_i = 10,020'')$$

Con $D = 10'' sch std$, se determina C_2 en la Fig. 17-9 del GPSA. Ver Anexo B. Figura B2

$$C_2 = 0,045$$

Con el diámetro pre-seleccionado verificar la velocidad, para tal fin, hacer uso de la ecuación (Ec. 2.05)

$$V_D = \frac{4 \times 2,478 \frac{\text{lb}}{\text{s}}}{0,208 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \times \pi \times \left(\frac{10,020}{12}\right)^2}$$

$$V_D = 21,756 \frac{\text{ft}}{\text{s}} \text{ (menor que 60 ft/s)}$$

Verificar caída de presión por cada 100 ft: (Ec. 2.07)

$$\Delta P_{100} = \frac{C_1 \times C_2}{\rho}$$

$$\Delta P_{100} = \frac{0,081 \times 0,045}{0,208 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}}$$

$$\Delta P_{100} = \frac{0,017 \text{ psi}}{100 \text{ ft}}$$

Presión al final del tramo: (Ec. 2.06)

$$P_2 = P_1 - \Delta P_{100} \times L$$

$$P_2 = 74,7 \text{ psia} - \frac{0,018 \text{ psi}}{100 \text{ ft}} \times 13.120 \text{ ft}$$

$$P_2 = 74,7 \text{ psia} - 0,0023616 \text{ psi}$$

$$P_2 = 74,698 \text{ psia}$$

El proceso se repite para cada tramo, tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- La presión de entrada de cada componente es la presión de salida del componente anterior, de acuerdo con el diagrama
- La densidad del fluido varía con la presión, por lo que se debe recalcular para cada tramo a la presión correspondiente.
- La caída de presión es función de la densidad, por lo que debe recalcularse en cada tramo.
- La condición del componente (línea o cabezal).

3.2.1.2. Alimentación a depurador V-01

El siguiente tramo es una línea de 43 ft, continuación de la anterior, por donde fluye todo el fluido del componente anterior. Esta línea tiene una tee; dos codos de 45°; dos codos de 90°; dos válvulas de bola. La Fig. 17-4 del GPSA, Ver Anexo C. Figura C1, muestra la longitud equivalente de

cada accesorio, de acuerdo con el diámetro de línea correspondiente. Para este componente:

$$P = P_2 = 74,698 \text{ psia}$$

$$M = 2,478 \frac{\text{lb}}{\text{s}} = 8\,921,9 \frac{\text{lb}}{\text{h}}$$

Densidad del gas: (Ec. 2.01)

$$\rho_g = \frac{74,698 \text{ psia} \times 16,23}{10,73 \frac{\text{psia} \times \text{ft}^3}{\text{R lb} \times \text{mol}} \times 555 \text{ R} \times 0,98}$$

$$\rho_g = 0,208 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$$

Flujo de gas: (Ec. 2.03)

$$Q_g = \frac{M_G}{\rho_g}$$

$$Q_g = \frac{2,478 \frac{\text{lb}}{\text{s}}}{0,208 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}}$$

$$Q_g = 11,913 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}$$

$$C_1 = 0,081$$

Se procede a calcular el diámetro, de igual forma que en el componente anterior.

$$V = 60 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \times 11,913 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}}{\pi \times 60 \frac{\text{ft}}{\text{s}}}}$$

$$D = 0,503 \text{ ft}$$

En pulgadas

$$D = 0,503 \text{ ft} \times 12 \frac{\text{in}}{\text{ft}}$$

$$D = 6,036 \text{ pulg}$$

La tubería comercial cuyo diámetro nominal cumple con el valor determinado, es la tubería de $\emptyset 6'' \text{ sch std}$ ($D_i = 6.065''$)

Con $D = 6''$ *sch std*, se determina C_2 en la Fig. 17-9 del GPSA. Ver Anexo B. Figura B2.

$$C_2 = 0,610$$

Con el diámetro pre-seleccionado verificar la velocidad, para tal fin, hacer uso de la ecuación (Ec. 2.05)

$$V_D = \frac{4 \times 2,478 \frac{\text{lb}}{\text{s}}}{0,208 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \times \pi \times \left(\frac{6,065}{12}\right)^2}$$

$$V_D = 59,38 \frac{\text{pie}}{\text{s}} \text{ (menor que 60 ft/s)}$$

Caída de presión por cada 100 ft: (Ec. 2.07)

$$\Delta P_{100} = \frac{0,081 \times 0,610}{0,208 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}}$$

$$\Delta P_{100} = \frac{0,238 \text{ psi}}{100 \text{ ft}}$$

Este valor está fuera del rango requerido (0,05 – 0,125), por lo que se incrementa el diámetro y se repite el cálculo: el siguiente diámetro nominal, es de la tubería de $\varnothing 8''$ *sch std* ($D_i = 7,981''$)

Con $D = 8''$ *sch std*, se determina C_2 en la Fig. 17-9 del GPSA. Ver Anexo B. Figura B2.

$$C_2 = 0,146$$

Velocidad (con el diámetro pre-seleccionado): (Ec. 2.05)

$$V_D = \frac{4 \times 2,478 \frac{\text{lb}}{\text{s}}}{0,208 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \times \pi \times \left(\frac{7,981}{12}\right)^2}$$

$$V_D = 34,29 \frac{\text{ft}}{\text{s}} \text{ (menor que 60 ft/s)}$$

Con el diámetro pre-seleccionado verificar la velocidad, para tal fin, hacer uso de la ecuación (Ec. 2.05)

$$\Delta P_{100} = \frac{C_1 \times C_2}{\rho}$$

$$\Delta P_{100} = \frac{0,081 \times 0,146}{0,208 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}}$$

$$\Delta P_{100} = \frac{0,057 \text{ psi}}{100 \text{ ft}}$$

Este valor está en el rango establecido.

Con el diámetro seleccionado y validado, se ubica en la tabla 17-4 de la GPSA la longitud equivalente de los accesorios, y se agrega este valor a la longitud de la línea. Ver Anexo C. Tabla C1.

Tabla 10. Longitudes equivalentes para \varnothing 8"

Accesorio	Long. Equiv (pie)
Tee	9
Codo 45°	6
Codo 90°	9
Válvula de bola	6

Fuente: *Data Engineering Book, 12th Ed, 2004 – GPSA.*

Elaboración: Joel Tavera.

$$L = 43 + 9 + 2 \times 6 + 2 \times 9 + 2 \times 6$$

$$L = 94,00 \text{ ft}$$

Presión al final del componente: (Ec. 2.06)

$$P_2 = P_1 - \Delta P_{100} \times L$$

$$P_2 = 74.698 \text{ psia} - \frac{0.057 \text{ psi}}{100 \text{ pie}} \times 94.000 \text{ ft}$$

$$P_2 = 74.698 \text{ psia} - 0.05358 \text{ psi}$$

$$P_2 = 74,644 \text{ psia}$$

3.2.2. Recipientes.

3.2.2.1. Cálculo del depurador de gas de entrada V-01.

Data de Entrada:

P: Presión de operación en el recipiente, psia

$$P = 60,00 \text{ psig} = 74,7 \text{ psia}$$

T: Temperatura de operación del recipiente

$$T = 95 \text{ °F} = 555 \text{ °R}$$

PM: Peso molecular del gas = 16,23

Z: Factor de compresibilidad = 0,98

Q: Flujo promedio de gas = 5,00 mmscfd

$$\text{GPM} \left(\frac{\text{gal}}{\text{mscf}} \right) (\text{C2} +) \text{ del gas} = 0,160$$

$$\text{Arrastre de líquidos: } 0,1 \frac{\text{gal}}{\text{mmscfd}}$$

$$\text{Arrastre de agua: } 2,310 \frac{\text{bbl}}{\text{día}}$$

K: Constante para dimensionamiento de separadores: 0.35. Ver Anexo D. Tabla D1.

Cálculos:

Para dimensionar depuradores, se debe determinar el caudal y características de los fluidos en el recipiente:

Los líquidos se determinan por la suma de los líquidos que condensan de la riqueza de gas, el arrastre en las líneas y el agua que pueda condensar.

1.- Líquido circulante: 0,160 GPM (galones por mscf): de 50 °API. Para 5,0 mmscfd, se tiene:

$$L_1 = \frac{\frac{0,160 \text{ gal}}{1000 \text{ scf}} \times 5.000.000,00 \frac{\text{scf}}{\text{d}}}{42 \frac{\text{gal}}{\text{bbl}}} = 19,048 \frac{\text{bbl}}{\text{d}}$$

2.- Arrastre de líquidos: $0,1 \frac{\text{gal}}{\text{mmscfd}}$ de crudo de la estación (50° API)

$$L_2 = \frac{0,1 \frac{\text{gal}}{\text{mmscfd}} \times 5,000 \frac{\text{mmscfd}}{\text{d}}}{42 \frac{\text{gal}}{\text{bbl}}} = 0,012 \frac{\text{bbl}}{\text{d}}$$

3.- Arrastre de agua 10° API (por condensación del gas saturado):

$$L_3 = 2,310 \frac{\text{bbl}}{\text{d}}$$

Caudal de líquidos:

$$q_T: L_1 + L_2 + L_3 = 21,37 \frac{\text{bbl}}{\text{d}}$$

Gravedad API de la mezcla: (Ec. 2.10)

$$^{\circ}\text{API}_m = \frac{^{\circ}\text{API}_1 \times L_1 + ^{\circ}\text{API}_2 \times L_2 + ^{\circ}\text{API}_3 \times L_3}{q_t}$$

$$^{\circ}\text{API}_m = \frac{50 \times 19,048 + 50 \times 0,012 + 10 \times 2,310}{21,37} = 45,68 \text{ } ^{\circ}\text{API}$$

Gravedad específica de la mezcla líquida: (Ec. 2.11)

$$Ge_L = \frac{141,5}{131,5 + \text{°API}} = \frac{141,5}{131,5 + 45,68}$$

$$Ge_L = 0,7986$$

Densidad de la mezcla líquida: (Ec. 2.12)

$$\rho_L = Ge_L \times \rho_{\text{agua}} = 0,7986 \times 62,06 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$$

$$\rho_L = 49,56 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$$

Flujo másico de gas M_G , a condiciones de operación: (Ec. 2.02)

$$M_G = \frac{5,00 \text{ mmscfd} \times 10^6 \times 16,23}{379 \times 24 \frac{\text{hr}}{\text{día}} \times 3600 \frac{\text{s}}{\text{hr}}}$$

$$M_G = 2,478 \frac{\text{lb}}{\text{s}} = 214.1116,09 \frac{\text{lb}}{\text{d}}$$

Flujo másico de líquido M_L , a condiciones de operación: (Ec. 2.22)

$$M_L = 21,37 \frac{\text{bbl}}{\text{d}} \times 49,56 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \times 0,15899 \frac{\text{m}^3}{\text{bbl}} \times 35,3147 \frac{\text{ft}^3}{\text{m}^3}$$

$$M_L = 0,0688 \frac{\text{lb}}{\text{s}} = 5.946,49 \frac{\text{lb}}{\text{d}}$$

Densidad del gas ρ_g , a condiciones de operación: (Ec. 2.01)

$$\rho_g = \frac{74,7 \text{ psia} \times 16,23}{10,73 \frac{\text{Psia pie}^3}{\text{lbmol} \times \text{°R}} \times 555 \text{R} \times 0,98}$$

$$\rho_g = 0,2077 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3}$$

Flujo de gas Q_g , a las condiciones del proceso (Ec. 2.03)

$$Q_g = \frac{2,478 \frac{\text{lb}}{\text{s}}}{0,2077 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}}$$

$$Q_g = 11,931 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}$$

Flujo de líquido Q_l , a las condiciones del proceso (Ec. 2.23)

$$Q_l = \frac{0,068 \frac{\text{lb}}{\text{s}}}{49,56 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}}$$

$$Q_1 = 0,0014 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}$$

Velocidad terminal del fluido dentro del separador (Ec. 2.14):

$$V_t = 0,35 \times \sqrt{\frac{(49,56 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} - 0,2077 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3})}{0,2077 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}}}$$

$$V_t = 5,395 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

Se asume un 85% de la velocidad terminal

$$V_t = 4,5857 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

Área transversal requerida (Ec. 2.16):

$$A = \frac{11,931 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}}{4,5857 \frac{\text{ft}}{\text{s}}}$$

$$A = 2,602 \text{ ft}^2$$

Diámetro requerido por el recipiente (Ec. 2.17):

$$D = \sqrt{\frac{4 \times 2,602 \text{ ft}^2}{3,14159}}$$

$$D = 1,820 \text{ pie} = 21,85 \text{ in}$$

La tubería comercial que cumple con un diámetro interno de al menos 21,85 pulgadas, es una tubería de 24 pulgadas, cuyo diámetro interno es de 23,250 pulgadas (1,938 pie)

$$D = 23,250 \text{ in} = 1,938 \text{ ft}$$

Altura requerida para gas (Ec. 2.18):

$$A_G = \frac{4 \times 11,931 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}}{\pi \times 4,5857 \frac{\text{ft}}{\text{s}} \times 1,938 \text{ ft}}$$

$$A_G = 1,709 \text{ ft}$$

El tiempo de retención del líquido en el separador para crudo de gravedad Específica menor que 0,85 es de un minuto. Ver Anexo E. Tabla E1.

Volumen requerido para líquidos (Ec. 2.19):

$$V_L = 21,37 \frac{\text{bbl}}{\text{d}} \times \frac{1 \text{min}}{1440 \frac{\text{min}}{\text{d}}}$$

$$V_L = 0,015 \text{ bbl}$$

Altura de líquido (Ec. 2.20):

$$A_L = \frac{22,46 \times 0,015 \text{ bbl}}{\pi \times 1,938^2 \text{ pie}^2}$$

$$A_L = 0,028 \text{ ft}$$

Mínima Altura requerida del separador (Ec. 2.21)

$$L_M = A_L + A_G = 0,028 \text{ ft} + 1,709 \text{ ft}$$

$$L_M = 1,737 \text{ ft}$$

$$\text{Relación } \frac{L}{D}: \frac{1,737 \text{ ft}}{1,938 \text{ ft}} = 0,896.$$

La relación $\frac{L}{D}$ no cumple el criterio de estar ubicada entre 2 y 4, por lo que se lleva la altura a un valor dentro de dicho rango.

$$L_M = 3 \times D = 3 \times 1,938$$

$$L_M = 5,813 \text{ ft} = 5' 10''$$

Cálculo del Diámetro de las Boquillas del Recipiente

Diámetro boquilla de alimentación al recipiente

Densidad de la mezcla en la alimentación, ρ_m (Ec. 2.13)

$$\rho_m = \frac{M_G \times \rho_g + M_L \times \rho_l}{M_G + M_L}$$

$$\rho_m = \frac{(214.111,09 \times 0,207 + 5.946,49 \times 49,56)}{214.111,09 + 5.946,49}$$

$$\rho_m = 1,54 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$$

Caudal de Alimentación, Q_t (Ec. 2.25):

$$Q_t = \frac{(214.111,09 + 5.946,49) \frac{\text{lb}}{\text{d}}}{1,54 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}}$$

$$Q_t = 142894.53 \frac{\text{ft}^3}{\text{d}} = 1,65 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}$$

Velocidad del fluido a la entrada, V_{NF} (Ec. 2.26):

$$V_{\text{NF}} = \frac{50}{\sqrt{1,54 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}}}$$

$$V_{\text{NF}} = 40,29 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

Diámetro de la boquilla de alimentación, D_{NF} (Ec. 2.24):

$$D_{\text{NF}} = \sqrt{\frac{4 \times 142894,53 \frac{\text{ft}^3}{\text{d}}}{\pi \times 40,29 \frac{\text{ft}}{\text{s}}}}$$

En pulgadas

$$D_{\text{NF}} = 12 \frac{\text{pulg}}{\text{pie}} \times \sqrt{\frac{4 \times 142894,53 \frac{\text{ft}^3}{\text{d}}}{\pi \times 40,29 \frac{\text{ft}}{\text{s}}}}$$

$$D_{\text{NF}} = 2,743 \text{ pulgadas}$$

Se requiere una boquilla de al menos Ø3" nominal.

Diámetro de la boquilla de salida de gas del recipiente

Velocidad del gas a la salida, V_{NG} (Ec. 2.27):

$$V_{\text{NG}} = \frac{60}{\sqrt{0,2077}} = 131,65 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

Diámetro de la boquilla de salida de gas, D_{NG} (Ec. 2.24):

$$D_{\text{NG}} = \sqrt{\frac{4 \times 11,931 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}}{\pi \times 131,65 \frac{\text{ft}}{\text{s}}}}$$

En pulgadas

$$D_{\text{NG}} = 12 \frac{\text{in}}{\text{ft}} \times \sqrt{\frac{4 \times 11,931 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}}{\pi \times 131,65 \frac{\text{ft}}{\text{s}}}}$$

$$D_{\text{NG}} = 4,076 \text{ in}$$

Se requiere una boquilla de al menos Ø5” nominal.

Diámetro de la boquilla de salida de líquido del recipiente.

Como la velocidad en la boquilla de salida del líquido se mantiene un valor de $3,3 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$.

Diámetro de la boquilla de salida de líquido, D_{NL} (Ec. 2.24):

$$D_{\text{NL}} = \sqrt{\frac{4 \times 0,0014 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}}{\pi \times 3,3 \frac{\text{ft}}{\text{s}}}}$$

En pulgadas

$$D_{\text{NL}} = 12 \frac{\text{in}}{\text{ft}} \times \sqrt{\frac{4 \times 0,0014 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}}{\pi \times 3,3 \frac{\text{ft}}{\text{s}}}}$$

$$D_{\text{NL}} = 0,278 \text{ in}$$

La boquilla de salida de líquido debe ser de al menos Ø $\frac{1}{2}$ pulgada.

3.2.2.2. Cálculo del Filtro de Gas Combustible/Instrumentos V-02/03

Para la adecuación del sistema de gas combustible de la Estación Compresora Laguna-Zapotlan, se ha considerado el uso de dos filtros gas-líquido. Entre las tecnologías comerciales disponibles, comúnmente utilizadas en la industria petrolera, destacan la serie 85 fabricada y distribuida por *Perry Equipment Corporation* (PECO) y los “*Absolute Separators*” fabricados y distribuidos por PEERLESS MFG CO.

En la Figura 5 se muestra el esquema de distribución de internos y ubicación de bocas de entrada y salida, suministrados por los fabricantes de los filtros.

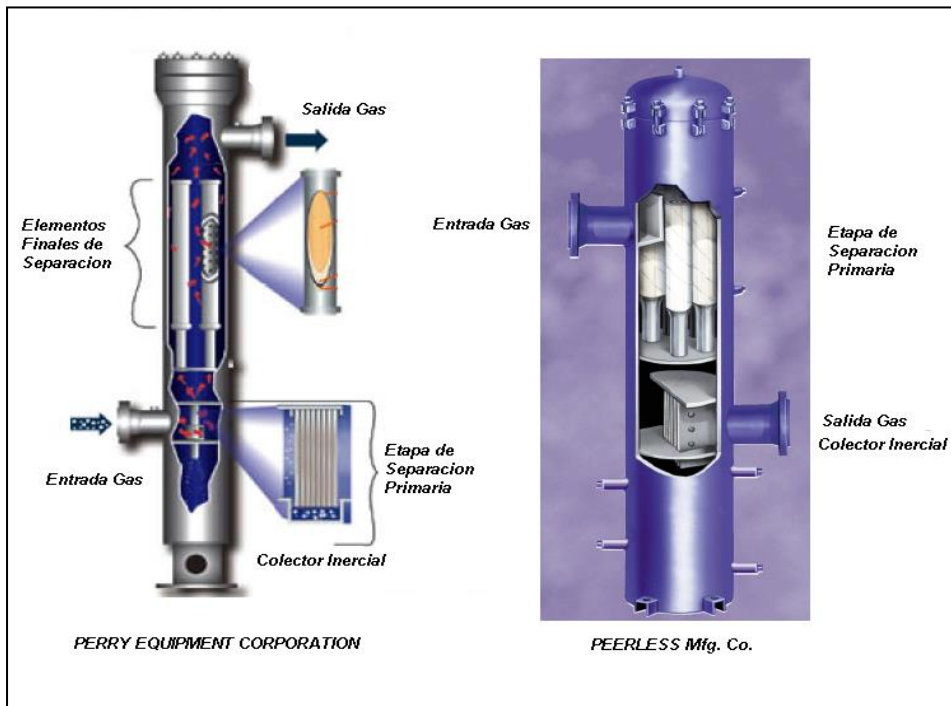


Figura 5. Depurador de gas
 Fuente: Perry Equipment Corporation (PECO)

3.2.2.3. Cálculo del Flujo Másico al Filtro de Gas Combustible V-02

Motores de Compresor.

El compresor a instalar en la Estación Laguna-Zapotál es marca *General Electric, modelo Gemini D504*, de cuatro etapas, 1400 rpm, 531 bhp y 2,37 mmscf de capacidad, accionados por un motor de combustión interna que utiliza gas como combustible. El motor es marca CATERPILLAR, modelo G3508 de 1400 rpm y 633 bhp (472 bkW). Este motor tiene un consumo de combustible de $7859,0 \frac{\text{btu}}{\text{bhp-hr}}$. El consumo de energía diario del motor es:

$$CG = \frac{CT \times 10^6}{VCN}$$

Donde:

CG: Consumo de gas, $\frac{\text{scf}}{\text{hr}}$

CT: Carga Térmica, $\frac{\text{mmbtu}}{\text{hr}}$

VCN: Valor Calorífico Neto, $\frac{\text{btu}}{\text{scf}}$

CT = Consumo de Combustible x Potencia

$$CT = 7859,0 \frac{\text{btu}}{\text{bhp-hr}} \times \frac{633,0 \text{ bhp}}{10^6} = 4,975 \frac{\text{mmbtu}}{\text{hr}}$$

$$CG = \frac{4,975 \frac{\text{mmbtu}}{\text{hr}} \times 10^6}{818,4 \frac{\text{btu}}{\text{scf}}}$$

$$CG = 6078,33 \frac{\text{scf}}{\text{hr}}$$

Agregando una contingencia de 25% y aplicando la condición de operación más severa en el área de compresión:

$$CG = 6.078,33 \frac{\text{scf}}{\text{hr}} \times 2 \text{ motores} \times 1,25\% = 16.208,89 \frac{\text{scf}}{\text{hr}}$$

$$CG = 389.013,35 \frac{\text{scf}}{\text{d}} = 0,39 \frac{\text{mmscf}}{\text{d}} \rightarrow 0,40 \frac{\text{mmscf}}{\text{d}}$$

El gas combustible requerido para el sistema de compresión es 0,40 mmscfd. Para el sistema de gas de instrumentos se deja una previsión de hasta 0,04 mmscfd, por lo que se calculan los filtros con 0,40 mmscfd.

Selección del modelo de filtro.

El proveedor presenta dos gráficas para selección del modelo adecuado para la aplicación. Ver Anexo G. Figuras G1 y G2.

La primera gráfica correlaciona la gravedad específica del gas a filtrar con la temperatura de operación y produce un factor de corrección a aplicar al flujo de gas. Con una temperatura de 95°F y una gravedad específica del gas de 0,560, se obtiene un factor de corrección de 0,96. En este caso, el valor disminuye el flujo de gas, y como medida de aseguramiento, se toma el valor 1.

La segunda gráfica correlaciona la tasa de flujo con la presión de operación. En esta gráfica se utiliza la presión mínima de operación (57 psig), se intercepta la tasa de flujo corregida con el factor

$$\left(\frac{0,40 \text{ mmscfd} \times 10^6 \times 1,0}{24 \frac{\text{hr}}{\text{d}}} = 16.862,50 \frac{\text{scf}}{\text{hr}} \right)$$

Se selecciona el equipo representado por la línea pendiente a la derecha de la intercepción mencionada (89-1-324-6-275). Este equipo es de 6 $\frac{5}{8}$ " de diámetro, boquilla de entrada de 2", boquilla de salida de gas de 2" y boquilla de salida de líquidos de 1" y elemento filtrante de 2" de diámetro.

Cálculo de Filtro de Gas Combustible V-02

El procedimiento de cálculo de los filtros es similar al de cualquier recipiente. Se muestran a continuación los resultados del cálculo.

Data de Entrada:

P: Presión de operación en el recipiente, psia

$$P = 57,00 \text{ psig} = 71,7 \text{ psia}$$

T: Temperatura de operación: $T = 95 \text{ }^\circ\text{F} = 555 \text{ }^\circ\text{R}$

PM: Peso molecular del gas = 16,23

Z: Factor de compresibilidad = 0,98

Q: Flujo promedio de gas = 400,00 mscfd (0,40 mmscfd)

GPM ($\frac{\text{gal}}{\text{mscf}}$)(C₂+) del gas = 0,1604

Arrastre de líquidos: $0,1 \frac{\text{gal}}{\text{mmscfd}}$

Arrastre de agua: $0,184 \frac{\text{bbl}}{\text{d}}$

K: Constante para dimensionamiento de separadores: 0,35. Ver Anexo D. Tabla D1.

Cálculos:

Para dimensionar depuradores, se debe determinar el caudal y características de los fluidos en el recipiente:

Los líquidos se determinan por la suma de los líquidos que condensan de la riqueza de gas, el arrastre en las líneas y el agua que pueda condensar.

1.- Líquido circulante: 0,160 GPM (galones por mscf): de 50 °API. Para 400.000,00 scfd, se tiene:

$$L_1 = \frac{0,160 \frac{\text{GPM}}{1000} \times 400.000,00 \frac{\text{scf}}{\text{d}}}{42 \frac{\text{gal}}{\text{bbl}}} = 1,55 \frac{\text{bbl}}{\text{d}}$$

2.- Arrastre de líquidos: $0,1 \frac{\text{gal}}{\text{mmscfd}}$ de crudo (50°API)

$$L_2 = \frac{0,1 \frac{\text{gal}}{\text{mmscfd}} \times 0,400 \frac{\text{mmscfd}}{\text{d}}}{42 \frac{\text{gal}}{\text{bbl}}} = 0,001 \frac{\text{bbl}}{\text{d}}$$

3.- Arrastre de agua 10°API (por condensación del gas saturado):

$$L_3 = \frac{0,019 \frac{\text{GPM}}{1000} \times 400.000,00 \frac{\text{scf}}{\text{d}}}{42 \frac{\text{gal}}{\text{bbl}}} = 0,184 \frac{\text{bbl}}{\text{d}}$$

Caudal de líquidos:

$$q_L: L_1 + L_2 + L_3 = 1,735 \frac{\text{bbl}}{\text{d}}$$

Gravedad API de la mezcla líquida: (Ec. 2.10)

$$^{\circ}\text{API}_m = \frac{^{\circ}\text{API}_1 \times L_1 + ^{\circ}\text{API}_2 \times L_2 + ^{\circ}\text{API}_3 \times L_3}{L_1 + L_2 + L_3}$$

$$^{\circ}\text{API}_m = \frac{50 \times 1,55 + 50 \times 0,001 + 10 \times 0,184}{1,71} = 46,43 \text{ } ^{\circ}\text{API}$$

Gravedad específica de la mezcla líquida: (Ec. 2.11)

$$Ge_L = \frac{141,5}{131,5 + \text{°API}} = \frac{141,5}{131,5 + 46,43}$$

$$Ge_L = 0,799$$

Densidad de la mezcla líquida: (Ec. 2.12)

$$\rho_L = Ge_L \times \rho_{\text{agua}} = 0,799 \times 62,06 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$$

$$\rho_L = 49,586 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$$

Flujo másico de gas (Ec. 2.02):

$$M_G = 0,198 \frac{\text{Lb}}{\text{s}} = 17\,129,97 \frac{\text{lb}}{\text{d}}$$

Densidad del gas a condiciones de operación (Ec. 2.01)

$$\rho_g = 0,1994 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$$

Flujo volumétrico de gas (Ec. 2.03):

$$Q_g = 0,994 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}$$

Velocidad terminal del gas (Ec. 2.14)

$$V_t = 5,507 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

Área transversal requerida (Ec. 2.16):

$$A = 0,181 \text{ ft}^2$$

Diámetro requerido (Ec. 2.17):

$$D = 0,479 \text{ ft} = 5,76 \text{ in}$$

Altura de gas (Ec. 2.18):

$$A_G = 0,563 \text{ ft}$$

Volumen de líquido en el recipiente (Ec. 2.19)

$$V_L = 0,0012 \text{ barriles}$$

Altura de líquido (Ec. 2.20):

$$A_L = 0,037 \text{ ft}$$

Mínima Altura requerida del separador (Ec. 2.21)

$$L_M = 0.600 \text{ ft}$$

El diámetro del equipo seleccionado es 0,5054 pies (6 pulgadas nominal) y su altura efectiva es 50 pulg (4,167 pie), por lo que el equipo seleccionado cumple con los criterios de relación longitud / diámetro, altura de gas y líquido y diámetro del filtro.

Cálculo del Diámetro de las Boquillas del Recipiente

Diámetro de la boquilla de alimentación

Densidad de la mezcla en la alimentación: (Ec. 2.13)

$$\rho_m = \frac{M_G \times \rho_g + M_L \times \rho_l}{M_G + M_L}$$

$$\rho_m = 1,54 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$$

Caudal de alimentación (Ec. 2.25)

$$Q_t = 11.463,16 \frac{\text{ft}^3}{\text{d}} = 0,13 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}$$

Velocidad del fluido a la entrada (Ec. 2.26):

$$V_{NF} = 40,34 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

Diámetro de la boquilla de alimentación (Ec. 2.24):

$$D_{NF} = 0,776 \text{ in}$$

El equipo seleccionado tiene una boquilla de 2", por lo que cumple lo requerido.

Diámetro de la boquilla de alimentación

Velocidad en la boquilla de salida del gas (Ec. 2.27):

$$V_{NG} = 134,36 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

Diámetro de la boquilla de salida de gas (Ec. 2.24):

$$D_{NG} = 1,165 \text{ in}$$

El equipo seleccionado tiene una boquilla de 2", por lo que cumple lo requerido.

Diámetro de la boquilla de salida de líquido del recipiente.

Caudal total de líquido la salida del recipiente (Ec. 2.23):

$$Q_l = 9,74 \frac{\text{ft}^3}{\text{d}} = 0,00011 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}$$

Diámetro de la boquilla de salida de líquido (Ec. 2.24):

$$D_{NL} = 0,079 \text{ in}$$

El equipo seleccionado tiene una boquilla de 1", por lo que cumple lo requerido.

3.2.2.4. Cálculo del Tanque de Almacenamiento del Gas de Arranque

Tiempo de almacenamiento (Ec. 2.29).

Seleccionando con seis intentos ($n=6$) se tiene:

$$T = 7 + 5 \times 2 = 17 \text{ s}$$

Volumen del Recipiente de almacenamiento (Ec.2.28).

El consumo de gas se toma de la Tabla 4, en la condición más desfavorable (mayor presión: $P_t = 165 \text{ psia}$ y mayor consumo de gas: $V_s = 12,6 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}$).

Para determinar la capacidad de almacenamiento usar la ecuación Ec. 2.28:

$$V_t = \frac{12,6 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}} \times 17 \text{ s} \times 14,7 \text{ psig}}{(150,3 - 90) \text{ psig}}$$

$$V_t = 52,22 \text{ ft}^3$$

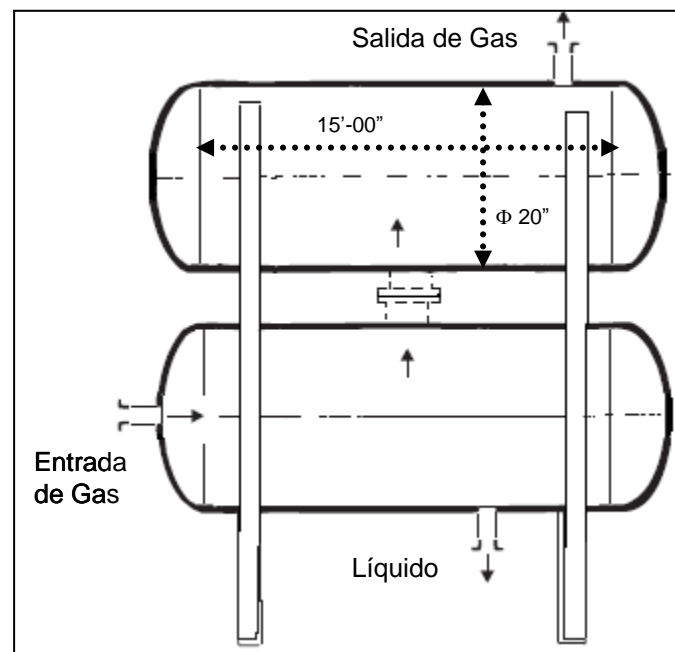


Figura 6. Pulmón de gas de arranque
Fuente: *Data Engineering Book, 12th Ed, 2004* – GPSA.

Como medida de aseguramiento, y tomando en cuenta las distancias de la tubería entre el almacenamiento de gas de arranque y el motor, se establece un rendimiento de 85%.

$$V_t = 52,48 \text{ pie}^3 \times (1 + (100 - 85)\%) = 60,35 \text{ ft}^3$$

Arreglo propuesto de almacenamiento.

Para almacenar el gas requerido utilizando el esquema planteado, se pueden realizar varias combinaciones de longitudes y diámetros. Se propone utilizar dos (02) tramos de tubería comercial, de 15'-0" de Ø20". Este arreglo permite almacenar 62,88 pie³ de gas, suficiente para el servicio requerido.

3.2.3. Estación de compresión

3.2.3.1. Descripción del proceso modelo de simulación

La Estación de Compresión Zapotal 04 (EZA-04), recibe el gas, proveniente de ocho pozos mediante un sistema de tuberías de recolección de fluidos, en una línea de Ø 8" a la entrada de la estación. Esta corriente se recibirá a temperaturas que oscilan entre 90 y 95 °F y la presión de los pozos se regulará, de forma que la corriente de gases se reciba a presiones de entre 60 y 65 psig. Los pozos producen un promedio de 1,75 mmscfd. El gas sale del cabezal y entra al depurador de entrada V-01, mediante una línea de Ø 8". La Tabla 11 lista los pozos productores e inyectores de gas asociados a EZA-04.

En la estación compresora, se incrementa la presión del gas de 50 psig a 3000 psig, y de allí se envía al sistema de inyección de gas, disponiendo de ocho pozos para esta actividad. La Tabla 11 lista los pozos para inyección de gas.

Los fluidos que salen del cabezal de entrada son enviados al depurador de entrada (V-01). En este se separa el gas que se envía al múltiple de la Estación compresora mediante una línea de Ø 8" y los líquidos, productos de condensación o algún arrastre se envían al sistema de drenaje por un cabezal de Ø 2".

Tabla 11. Listado de Pozos Productores e Inyectores. EZA-04

Pozo productores	Pozos Inyectores
7039	5913
7001	5961
7198	6103
7101	6139
7042	6252
7092	6264
7033	6538
6412	7098

Fuente: Información de Petrobras Energía S.A.
Elaboración: Joel Tavera.

El gas proveniente del separador de producción (V-01), llega al múltiple de la estación compresora, desde donde se envía al cabezal de succión del sistema de compresión, de Ø 10", por una línea de Ø 8". Esta línea posee una válvula reguladora de presión, que baja la presión hasta 50 psig, de acuerdo con el requerimiento del compresor.

Una parte del gas depurado (consumo máximo: 0,30 mmscfd) es dirigida desde la salida del depurador de gas de entrada (V-01) al sistema de gas combustible, por una tubería de distribución de Ø 4"; pasa por una nueva etapa de depuración de líquidos por el filtro V-02. De este equipo, el gas se envía al cabezal de gas combustible. De separarse algún líquido, este se envía al sistema de drenaje por una línea de Ø 2"

El cabezal del sistema de gas combustible está constituido por una línea de Ø 6", con capacidad para suplir gas a dos compresores, mediante líneas de Ø 2". La línea de gas combustible posee una válvula que regula la presión a 10 psig, de acuerdo al requerimiento del motor.

Otra parte del gas depurado (consumo máximo: 0,13 mmscfd) es dirigida desde la línea de salida del filtro de gas combustible (V-02) al sistema de gas para instrumentos, por un cabezal de distribución de Ø 2"; pasa por una nueva etapa de depuración de líquidos por el filtro V-03. De este equipo, el gas se envía a los instrumentos que así lo requieran. De separarse algún líquido, este se envía al sistema de drenaje por una línea de Ø 2".

La Estación Compresora tiene un sistema de gas de arranque, que consiste en un sistema de almacenamiento de gas a una presión de 200 psig. Este sistema permite almacenar 70 pie³ de gas, cantidad suficiente para hacer hasta seis (06) intentos de arranque, de acuerdo con el fabricante del motor. El gas de arranque se envía hacia el motor mediante una línea de Ø 2", hace girar el arranque y permite encender el motor. Este sistema se cargará con gas proveniente del sistema de gas a venta, mediante una línea de Ø 2", la cual contará con una válvula para regular la presión a 200 psig. En el caso que el sistema de inyección no pueda recibir toda la producción enviada, el sistema de control de presión desviará, toda o parte de la corriente de gas producida hacia el sistema de gas a venta a través de la tubería de Ø 4".

Para efecto de contabilidad de la producción de gas de la estación se mide el gas producido, aguas arriba del depurador de entrada (V-01). De igual forma, se contabiliza el gas enviado a compresión y el gas combustible, aguas arriba de las válvulas de control de presión (PRV-04) a la entrada del motor y el gas que se toma del sistema de gas a venta para el gas de arranque. El gas venteado se contabiliza por medición indirecta de flujo.

3.2.3.2. Evaluación del Sistema

Para la evaluación del sistema de tuberías, cabezales de succión / descarga de los compresores y multiplex de inyección de 3000 psig, de EZA-04, se ha establecido como condición de operación; un flujo volumétrico de 5,0 mmscfd de gas, compresores $\frac{C-1}{C-2}$ en operación y la presión en los cabezales reportada.

Se incluye:

- Compresores de Gas (C-1y C-2), marca GEMINI, modelo D504, tipo reciprocante separable, de capacidad nominal 2,37 mmscfd, presión de succión 50 psig y presión a la descarga de 3000 psig. Accionado por motor de combustión interna a gas, marca CATERPILLAR, modelo G3508.
- Depurador Gas Entrada (V-01), tipo vertical, 24" O.D x 7'- 6" S/S, con capacidad para 5,0 mmscfd de gas y 27 bpd de líquidos.
- Filtro Depurador de Gas Combustible (V-02), tipo vertical, 6" O.D x 4'- 9" S/S, con capacidad para 0,40 mmscfd de gas y 0,1 bpd de líquidos.
- Filtro Depurador de Gas Instrumentos (Supply V-03), tipo vertical, 6" O.D x 4'- 9" S/S, con capacidad para 0,40 mmscfd de gas y 0,1 bpd de líquidos.
- Pulmón Gas Arranque ($\frac{V-04}{V-05}$), tipo horizontal, doble botella de 16" O.D x 13'-10" S/S, con capacidad para 70 pie³.
- Tuberías y cabezales de succión/ descarga de interconexión entre equipos y facilidades en planta para la distribución de gas inyección.
- Dos manifolds de campo para gas de inyección $\frac{M-1}{M-2}$, cada uno de cuatro puestos.
- Línea de distribución principal de gas de diámetro 2" por 3,00 km, material acero al carbono API 5L Gr. B, *sch* 160.
- Líneas de distribución a pozos inyectoras de gas de diámetro 2", material acero al carbono API 5L Gr. B, *sch* 160.

Tabla 12. Evaluación del Sistema.

Equipo	Caudal ⁽¹⁾ (mmscfd)	Entrada		Salida	
		° F	Psig	° F	Psig
Compresor C-1	2,33	94,49	50,18	119,89	3000
Compresor C-2	2,33	94,49	50,18	119,89	3000

Fuente: Información de Petrobras Energía S.A.

Elaboración: Joel Tavera.

En las tablas 13 a la 29, se observan los resultados para la evaluación del sistema. Los cuales se han obtenido de ejecutar la simulación del sistema utilizando el software HYSYS.

Tabla 13. Evaluación del Sistema. Entrada Estación Depurador V-01.

Tramo	Accesorio	Dia. (in)	Long. (m)	Caudal (mmscfd)	Pe (psig)	Ps (psig)	Temp (°F)	Veloc. (ft/s)	$\frac{\Delta P}{100 \text{ ft}}$
Entrada Estación Depurador V-01	Tubería	8	1,50	5,00	60,00	59,99	94,99	34,62	0,0602
	Válvula	8	-	5,00	59,99	59,99	94,99	34,62	-
	Tubería	8	4,50	5,00	59,99	59,99	94,99	34,63	0,0602
	Válvula	8	-	5,00	59,99	59,99	94,99	34,63	-
	Válvula On Off	8	-	5,00	59,99	59,35	94,96	34,93	-
	Tubería	8	2,50	5,00	59,35	59,34	94,96	34,93	0,0625
	Medición	8	-	5,00	59,34	59,34	94,96	249,02	-
	Tubería	8	4,50	5,00	59,34	59,33	94,96	34,93	0,0625
	Codo 90°	8	-	5,00	59,33	59,32	94,96	34,94	-
	Tubería	8	1,22	5,00	59,32	59,31	94,95	34,94	0,1627
	Codo 90°	8	-	5,00	59,31	59,31	94,95	34,95	-
	Tubería	8	0,80	5,00	59,31	59,31	94,95	34,95	0,0625
	Tee	8	-	5,00	59,31	59,30	94,95	34,95	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Evaluación del Sistema. Salida Depurador V-01 a Filtro Depurador V-02.

Tramo	Accesorio	Dia. (in)	Long. (m)	Caudal (mmscfd)	Pe (psig)	Ps (psig)	Temp (°F)	Velocidad (ft/s)	$\frac{\Delta P}{100 \text{ ft}}$
Salida Depurador V-01 Alimentación V-02	Tubería	8	0,30	5,00	57,31	57,30	94,83	35,92	0,1617
	Codo 90°	8	-	5,00	57,30	57,29	94,83	35,93	-
	Tubería	8	1,00	5,00	57,29	57,28	94,83	35,93	0,0643
	Codo 90°	8	-	5,00	57,28	57,27	94,83	35,94	-
	Tubería	8	2,29	5,00	57,27	57,28	94,85	35,94	0,0734
	Codo 90°	8	-	5,00	57,28	57,26	94,85	35,94	-
	Tubería	8	4,50	5,00	57,26	57,26	94,86	35,94	0,0643
	Válvula	8	-	5,00	57,26	57,25	94,86	35,95	-
	Tubería	8	1,50	5,00	57,25	57,25	94,86	35,95	0,0643

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15. Evaluación del Sistema. Alimentación Filtro Depurador V-01 Múltiple EC.

Tramo	Accesorio	Dia (in)	Long. (m)	Caudal (mmscfd)	Pe (psig)	Ps (psig)	Temp (°F)	Velocidad (ft/s)	$\frac{\Delta P}{100 \text{ ft}}$
Tee Alimentación V-02 - Múltiple PC	Tee	8	-	4,66	57,25	57,23	94,86	33,51	-
	Tubería	8	0,30	4,66	57,23	57,21	94,87	33,52	0,0562
	Codo 45°	8	-	4,66	57,21	57,21	94,87	33,53	-
	Tubería	8	0,30	4,66	57,21	57,20	94,87	33,53	0,1535
	Codo 45°	8	-	4,66	57,20	57,20	94,87	33,53	-
	Tubería	8	1,85	4,66	57,20	57,20	94,87	33,53	-0,0562

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. Evaluación del Sistema. Múltiple EC.

Tramo	Accesorio	Dia (in)	Long. (m)	Caudal (mmscfd)	Pe (psig)	Ps (psig)	Temp (°F)	Veloc. (ft/s)	$\frac{\Delta P}{100 \text{ ft}}$
Múltiple PC	Tubería	10	3,30	4,66	57,20	57,20	94,87	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17. Evaluación del Sistema. Alimentación C-1 desde Múltiple EC.

Tramo	Accesorio	Diá (in)	Long. (m)	Caudal (mmscfd)	Pe (psig)	Ps (psig)	Temp (°F)	Veloc. (ft/s)	$\frac{\Delta P}{100 \text{ ft}}$
Alimentación C-1 Desde Múltiple PC	Tubería	8	0,30	2,33	57,20	57,20	94,87	16,77	0,0150
	Codo 45°	8	-	2,33	57,20	57,19	94,87	16,77	-
	Tubería	8	0,70	2,33	57,19	57,20	94,88	16,77	0,0822
	Codo 45°	8	-	2,33	57,20	57,20	94,88	16,77	-
	Tubería	8	0,50	2,33	57,20	57,20	94,88	16,77	0,0150
	Válvula	8	-	2,33	57,20	57,19	94,88	16,77	-
	Tubería	8	4,00	2,33	57,19	57,19	94,89	16,77	0,0150
	Medición	8	-	2,33	57,19	57,19	94,89	229,26	-
	Tubería	8	2,00	2,33	57,19	57,19	94,89	16,77	0,0150
	Válvula reguladora	8	-	2,33	57,19	50,19	94,48	275,60	-
	Tubería	8	0,50	2,33	50,19	50,19	94,49	18,58	0,0166
	Codo 45°	8	-	2,33	50,19	50,19	94,49	18,58	-
	Tubería	8	1,22	2,33	50,19	50,18	94,49	18,58	0,1043
	Codo 45°	8	-	2,33	50,18	50,18	94,49	18,58	-
	Tubería	8	0,30	2,33	50,19	50,18	94,49	18,58	0,0166

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18. Evaluación del Sistema. Alimentación C-2 desde Múltiple EC.

Tramo	Accesorio	Dia (in)	Long. (m)	Caudal (mmscfd)	Pe (psig)	Ps (psig)	Temp (°F)	Veloc. (ft/s)	$\frac{\Delta P}{100 \text{ ft}}$
Línea de Alimentación C-2 Desde Múltiple PC	Tubería	8	0,30	2,33	50,18	57,20	94,87	16,77	0,0150
	Codo 45°	8	-	2,33	57,20	57,19	94,87	16,77	-
	Tubería	8	0,70	2,33	57,19	57,20	94,88	16,77	0,0822
	Codo 45°	8	-	2,33	57,20	57,20	94,88	16,77	-
	Tubería	8	0,50	2,33	57,20	57,20	94,88	16,77	0,0150
	Válvula	8	-	2,33	57,20	57,19	94,88	16,77	-
	Tubería	8	4,00	2,33	57,19	57,19	94,89	16,77	0,0150
	Medición	8	-	2,33	57,19	57,19	94,89	229,26	-
	Tubería	8	2,00	2,33	57,19	57,19	94,89	16,77	0,0150
	Válvula reguladora	8	-	2,33	57,19	50,19	94,48	275,60	-
	Tubería	8	0,50	2,33	50,19	50,19	94,49	18,58	0,0166
	Codo 45°	8	-	2,33	50,19	50,19	94,49	18,58	-
	Tubería	8	1,22	2,33	50,19	50,18	94,49	18,58	0,1043
	Codo 45°	8	-	2,33	50,18	50,18	94,49	18,58	-
Tubería	8	0,30	2,33	50,19	50,18	94,49	18,58	0,0166	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19. Evaluación del Sistema. Descarga C-1 a Múltiple de Inyección.

Tramo	Accesorio	Dia (in)	Long. (m)	Caudal (mmscfd)	Pe (psig)	Ps (psig)	Temp (°F)	Vel (ft/s)	$\frac{\Delta P}{100 \text{ ft}}$
Descarga C-1 Múltiple Inyección	Tubería	3	0,50	2,33	3000,00	3.000,00	119,89	3,34	0,0971
	Válvula	3	-	2,33	3000,00	2.999,97	119,89	3,34	-
	Tubería	3	0,50	2,33	2999,97	2.999,96	119,77	3,34	0,0970
	Codo 45°	3	-	2,33	2999,96	2.999,96	119,77	3,34	-
	Tubería	3	3,11	2,33	2999,96	3.000,41	119,31	3,33	4,4206
	Tubería	3	8,00	2,33	3000,41	3.000,39	117,60	3,32	0,0967
	Codo 45°	3	-	2,33	3000,39	3.000,38	117,60	3,32	-
	Tubería	3	2,41	2,33	3000,38	3.000,00	117,28	3,31	4,8765
	Codo 45°	3	-	2,33	3000,00	3.000,00	117,28	3,31	-
	Tubería	3	0,50	2,33	3000,00	2.999,99	117,18	3,31	0,0963

Tramo	Accesorio	Dia (in)	Long. (m)	Caudal (mmscfd)	Pe (psig)	Ps (psig)	Temp (°F)	Vel (ft/s)	$\frac{\Delta P}{100 \text{ ft}}$
	Válvula Check	3	-	2,33	2999,99	2.999,88	117,18	3,31	-
	Tubería	3	0,50	2,33	2999,88	2.999,87	117,08	3,31	0,0963
	Válvula	3	-	2,33	2999,87	2.999,87	117,08	3,31	-
	Tubería	3	0,50	2,33	2999,87	2.999,87	116,98	3,31	0,0963

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20. Evaluación del Sistema. Descarga C-2 a Múltiple de Inyección.

Tramo	Accesorios	Dia (in)	Long (m)	Caudal (mmscfd)	Pe (psig)	Ps (psig)	Temp (°F)	Veloc. (ft/s)	$\frac{\Delta P}{100 \text{ ft}}$
Descarga C-2 Múltiple Inyección	Tubería	3	0,50	2,33	3.000,00	3.000,00	119,89	3,34	0,0971
	Válvula	3	-	2,33	3.000,00	2.999,97	119,89	3,34	-
	Tubería	3	0,50	2,33	2.999,97	2.999,96	119,77	3,34	0,0970
	Codo 45°	3	-	2,33	2.999,96	2.999,96	119,77	3,34	-
	Tubería	3	3,11	2,33	2.999,96	3.000,41	119,31	3,33	4,4206
	Tubería	3	8,00	2,33	3.000,41	3.000,39	117,60	3,32	0,0967
	Codo 45°	3	-	2,33	3.000,39	3.000,38	117,60	3,32	-
	Tubería	3	2,41	2,33	3.000,38	3.000,00	117,28	3,31	4,8765
	Codo 45°	3	-	2,33	3.000,00	3.000,00	117,28	3,31	-
	Tubería	3	0,50	2,33	3.000,00	2.999,99	117,18	3,31	0,0963
	Válvula Check	3	-	2,33	2.999,99	2.999,88	117,18	3,31	-
	Tubería	3	0,50	2,33	2.999,88	2.999,87	117,08	3,31	0,0963
	Válvula	3	-	2,33	2.999,87	2.999,87	117,08	3,31	-
Tubería	3	0,50	2,33	2.999,87	2.999,87	116,98	3,31	0,0963	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21. Evaluación del Sistema. Múltiple de Inyección a Múltiple -1.

Tramo	Accesorio	Dia (in)	Long. (m)	Caudal (mmscfd)	Pe (psig)	Ps (psig)	Temp (°F)	Veloc. (ft/s)	$\frac{\Delta P}{100 \text{ ft}}$
Múltiple Inyección Múltiple -1	Tubería	2	30,00	2,33	2.998,87	2.999,81	116,80	8,01	0,9479
	Válvula reguladora	2	-	2,33	2.999,81	2.007,00	119,89	5,88	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22. Evaluación del Sistema. Múltiple de Inyección a Múltiple -2.

Tramo	Accesorio	Dia (in)	Long. (m)	Caudal (mmscfd)	Pe (psig)	Ps (psig)	Temp. (°F)	Veloc. (ft/s)	$\frac{\Delta P}{100 \text{ ft}}$
Múltiple Inyección Múltiple -2	Tubería	2	1,90	2,33	3.000,00	3.000,00	117,06	8,01	3,5994
	Tubería	2	30,00	2,33	3.000,00	2.999,22	116,80	8,01	0,9476
	Válvula reguladora	2	-	2,33	2.999,22	2.128,00	97,37	5,88	-
	Tubería	2	346,70	2,33	2.128,00	2.113,09	96,65	10,57	1,3334
	Tubería	2	710,50	2,33	2.113,09	2.081,69	95,41	10,69	1,3530
	Tubería	2	1.898,00	2,33	2.081,69	2.001,56	93,52	11,06	1,3033

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23. Evaluación del Sistema. Alimentación a Filtro Depurador V-02.

Tramo	Accesorio	Dia (in)	Long. (m)	Caudal (mmscfd)	Pe (psig)	Ps (psig)	Temp. (°F)	Veloc. (ft/s)	$\frac{\Delta P}{100 \text{ ft}}$
Alimentación V-02 Depurador Gas Combustible	Tee	4	-	0,34	57,25	57,25	94,86	9,61	-
	Tubería	4	0,50	0,34	57,25	57,25	94,86	9,61	0,0122
	Codo 90°	4	-	0,34	57,25	57,25	94,86	9,61	-
	Tubería	4	4,50	0,34	57,25	57,25	94,90	9,61	0,0122
	Válvula	4	-	0,34	57,25	57,25	94,90	9,61	-
	Tubería	4	0,30	0,34	57,25	57,25	94,90	9,61	0,0122
	Codo 90°	4	-	0,34	57,25	57,24	94,90	9,61	-
	Tubería	4	0,03	0,34	57,24	57,24	94,90	9,61	0,1095
	Codo 90°	4	-	0,34	57,24	57,24	94,90	9,61	-
Tubería	4	0,50	0,34	57,24	57,24	9,61	9,61	0,0122	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24. Evaluación del Sistema. Alimentación a Filtro Depurador V-03.

Tramo	Accesorio	Dia (in)	Long. (m)	Caudal (mmscfd)	Pe (psig)	Ps (psig)	Temp. (°F)	Veloc. (ft/s)	$\frac{\Delta P}{100 \text{ ft}}$
Alimentación V-03 Depurador Gas Supply	Tubería	4	0,50	0,34	55,24	55,24	94,79	9,88	0,0126
	Codo 90°	4	-	0,34	55,24	55,24	94,79	9,88	-
	Tubería	4	0,21	0,34	55,24	55,24	94,79	9,88	0,1211
	Codo 90°	4	-	0,34	55,24	55,24	94,79	9,88	-
	Tubería	4	0,30	0,34	55,24	55,24	94,80	9,88	0,0126
	Válvula	4	-	0,34	55,24	55,24	94,84	9,88	-
	Tubería	4	4,30	0,34	55,24	55,24	94,84	9,88	0,0126
	Codo 90°	4	-	0,34	55,24	55,24	94,84	9,89	-
Tubería	4	2,20	0,34	55,24	55,24	94,86	9,89	0,0126	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25. Evaluación del Sistema. Alimentación a Múltiple Gas Combustible.

Tramo	Accesorio	Dia (in)	Long. (m)	Caudal (mmscfd)	Pe (psig)	Ps (psig)	Temp. (°F)	Veloc. (ft/s)	$\frac{\Delta P}{100 \text{ ft}}$
Alimentación desde V-03 a Múltiple de Gas Combustible	Tee	4	-	0,30	55,24	55,24	94,86	8,72	-
	Tubería	4	9,80	0,30	55,24	55,23	94,93	8,72	0,0100
	Codo 45°	4	-	0,30	55,23	55,23	94,93	8,72	-
	Tubería	4	1,00	0,30	55,23	55,23	94,93	8,72	0,1045
	Codo 45°	4	-	0,30	55,23	55,23	94,93	8,73	-
	Tubería	4	0,30	0,30	55,23	55,23	94,93	8,73	0,0100

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26. Evaluación del Sistema. Múltiple Gas Combustible.

Tramo	Accesorio	Dia (in)	Long. (m)	Caudal (mmscfd)	Pe (psig)	Ps (psig)	Temp. (°F)	Veloc. (ft/s)	$\frac{\Delta P}{100 \text{ ft}}$
Múltiple Gas Combustible	Tubería	6	-	0,30	55,23	55,23	94,93	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27. Evaluación del Sistema. Gas Combustible a Motor de Compresor C-1.

Tramo	Accesorio	Dia (in)	Long. (m)	Caudal (mmscfd)	Pe (psig)	Ps (psig)	Temp. (°F)	Veloc. (ft/s)	$\frac{\Delta P}{100 \text{ ft}}$
Alimentación Gas Combustible a Motor de Compresor C-1	Tubería	2	0,30	0,15	55,23	55,23	94,93	16,55	0,0750
	Codo 45°	2	-	0,15	55,23	55,23	94,93	16,55	-
	Tubería	2	0,7	0,15	55,23	55,23	94,93	16,55	0,0195
	Codo 45°	2	-	0,15	55,23	55,23	94,94	16,55	-
	Tubería	2	1	0,15	55,23	55,22	94,95	16,55	0,0750
	Válvula	2	-	0,15	55,22	55,22	94,95	16,55	-
	Tubería	2	3	0,15	55,22	55,22	94,96	16,55	0,0750
	Medición	2	-	0,15	55,22	55,22	94,96	88,79	-
	Tubería	2	20	0,15	55,22	55,21	94,95	18,06	0,2086
	Válvula reguladora	2	-	0,15	55,21	10,01	92,30	18,25	-
	Tubería	2	0,3	0,15	10,01	10,00	92,38	46,92	0,2126

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28. Evaluación del Sistema. Gas Combustible a Motor de Compresor C-2.

Tramo	Accesorio	Dia (in)	Long. (m)	Caudal (mmscfd)	Pe (psig)	Ps (psig)	Temp. (°F)	Veloc. (ft/s)	$\frac{\Delta P}{100 \text{ ft}}$
Alimentación Gas Combustible a Motor de Compresor C-2	Tubería	2	0,30	0,15	10,00	55,23	94,93	16,55	0,0750
	Codo 45°	2	-	0,15	55,23	55,23	94,93	16,55	-
	Tubería	2	0,7	0,15	55,23	55,23	94,93	16,55	0,0195
	Codo 45°	2	-	0,15	55,23	55,23	94,94	16,55	-
	Tubería	2	1	0,15	55,23	55,22	94,95	16,55	0,0750
	Válvula	2	-	0,15	55,22	55,22	94,95	16,55	-
	Tubería	2	3	0,15	55,22	55,22	94,96	16,55	0,0750
	Medición	2	-	0,15	55,22	55,22	94,96	88,79	-
	Tubería	2	20	0,15	55,22	55,21	94,95	18,06	0,2086
	Válvula reguladora	2	-	0,15	55,21	10,01	92,30	18,25	-
	Tubería	2	0,3	0,15	10,01	10,00	92,38	46,92	0,2126

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 29. Evaluación del Sistema. Gas Supply a Instrumentos.

Tramo	Accesorio	Dia (in)	Long. (m)	Caudal (mmscfd)	Pe (psig)	Ps (psig)	Temp. (°F)	Veloc. (ft/s)	$\frac{\Delta P}{100 \text{ ft}}$
Salida V-03 Depurador Gas de Instrumentos	Tubería	2	12,00	0,04	55,24	55,23	95,01	4,41	0,0066

Fuente: Elaboración propia.

3.2.4. Líneas de Recolección

3.2.4.1. Descripción del Proceso Modelo de Simulación

El gas producido proviene de los pozos 7033, 7001, 6412, 7039, 7042, 7092, 7198 y 7101, de los cuales los 6 primeros fluyen a un ramal de 4 pulgadas de acuerdo a su ubicación, luego este ramal amplía el diámetro a 8 pulgadas donde fluyen los últimos dos pozos nombrados, posteriormente este ramal amplía su diámetro a 10 pulgadas para finalizar disminuyendo a 8 pulgadas antes de entrar a la planta EZA-04.

3.2.4.2. Casos Evaluados

Para la validación del sistema de recolección del gas fluyendo a la estación de compresión EZA-04 se ha establecido como condición de operación; un flujo volumétrico de 1,75 mmscfd de gas fluyendo a 60 psi hasta la entrada a planta.

3.2.4.3. Validación del Sistema

Para el balance de masas en los diferentes sistemas de tubería, se emplearon los caudales de producción de gas y parámetros de operación (P y T) que se verificaron en los pozos al momento de la visita a las instalaciones. Esto permite validar el comportamiento actual de los sistemas y predecir su desempeño futuro al variar las fuentes de alimentación o los valores de presión y temperatura la cual operan los equipos. En la Tabla 30 se muestra las alturas de los pozos y en la tabla 31 se observa los resultados para la validación del modelo de simulación del sistema.

Tabla 30. Alturas de los pozos.

Pozos Productores	Altura (ft)	Altura (mts)
EA 7033	918	279,81
EA 7001	894	272,49
EA 6412	885	269,75
EA 7039	863	263,04
EA 7042	886	270,05
EA 7092	847	258,17
EA 7198	863	263,04
EA 7101	848	258,47

Fuente: Información de Petrobras Energía S.A.
Elaboración: Joel Távora.

Tabla 31. Validación del Modelo de Simulación Sistema de Recolección de Gas a Sistema Existente de 400 psig.

Pozo	Caudal (mmscfd)	Salida (psig)			Entrada (psig)		
		Línea	Simulación	Variación (%)	Gasod.	Simulación	Variación (%)
7039	0,23	440	440	0	400	404	0,1
7001	0,001	440	440	0	400	404	0,1
7198	0,13	410	410	0	400	404	0,1
7101	0,06	430	430	0	400	404	0,1
7042	0,68	440	440	0	400	404	0,1
7092	0,65	400	420	4,7	400	404	0,1
7033	0,001	450	450	0	400	404	0,1
6412	0,001	470	470	0	400	404	0,1

Fuente: Información de Petrobras Energía S.A.

Elaboración: Joel Távora.

3.2.4.4. Evaluación del Sistema fluyendo a EZA-04

Una vez validado el modelo al realizar cambios en la presión de llegada se estima que el comportamiento reproduzca lo que sucederá en el futuro al realizar dichos cambios. Para el balance de masas en los diferentes sistemas de tubería, se emplearon los caudales de producción de gas y parámetros de operación. Como premisa se toma como presión de entrada a la planta 60 psig y se determina que presión de línea se requiere para mantener el caudal y preservar la energía del yacimiento al requerir diámetros menores a los que actualmente posee. En la tabla 32 se muestra los resultados para este modelo de simulación del sistema.

Tabla 32. Resultados del Modelo de Simulación líneas de recolección a EZA-04

Tramo	Dia (in)	Long. (m)	Caudal (mmscfd)	Pe (psig)	Ps (psig)	Temp (°F)	Velocidad (ft/s)	P/100 ft
7033 – LR 4"	2	456	0,001	65	65,03	94,99	0,0097	0,0027
7001 – LR 4"	2	118	0,001	65	65,03	94,99	0,097	0,0090
TRAMO LR 4"	4	328	0,002	65,03	65,05	94,99	0,051	0,0014
6412 – LR 4"	2	402	0,001	65	65,05	94,99	0,097	0,0038
TRAMO LR 4"	4	510	0,003	65,05	61,31	94,98	0,076	0,0012
7039- LR 4"	2	761	0,23	65	61,31	94,98	22,96	0,1490
TRAMO LR 4"	4	549	0,233	61,31	60,82	95,07	6,24	0,0076
7042 – LR 4"	2	100	0,68	65	60,82	95,07	48,25	0,338
7092 – LR 4"	2	200	0,65	65	60,82	95,07	46,79	0,4888
4" a 8"	4	5	1,563	60,82	60,79	95,05	42,08	0,2095
TRAMO LR 8"	8	924	1,563	60,79	60,61	94,96	10,72	0,0057
7101 – 7198	2	1233	0,06	65	64,76	94,98	4,17	0,0060
7198 – LINEA 2"	2	91	0,13	65	64,76	94,98	12,59	0,0504

Tramo	Dia (in)	Long. (m)	Caudal (mmscfd)	Pe (psig)	Ps (psig)	Temp (°F)	Velocidad (ft/s)	P/100 ft
7198 – LR 8"	2	150	0,19	64,76	60,61	94,94	8,41	0,0448
TRAMO LR 10"	10	1617	1,753	60,61	60,53	94,99	7,64	0,0017
TRAMO LR 10" – 8"	8	357	1,753	60,53	60,43	95,01	12,03	0,0084

Fuente: Elaboración propia.

Se observa una baja velocidad de gas (menor a $60 \frac{\text{pies}}{\text{s}}$) en la tubería y caídas de presión $< \frac{2 \text{ Psi}}{100 \text{ pie}}$, estos corresponden a un bajo flujo volumétrico de gas por estas líneas y arreglos de tuberías.

3.2.5. Líneas de Inyección

3.2.5.1. Descripción del Proceso Modelo de Simulación

El gas producido proviene de los pozos 7033, 7001, 6412, 7039, 7042, 7092, 7198 y 7101, los cuales fluyen a la estación EZA-04 donde es comprimido en cuatro etapas de 60 a 3000 psi. El compresor descarga a un cabezal de donde salen dos líneas asociadas cada una a un múltiple de inyección. La primera al múltiple uno (1) de cuatro puestos asignado cada uno a un pozo de inyección (7098, 6139, 5913 y 5961), la segunda línea al múltiple dos (2) el cual posee igualmente cuatro puestos para igual número de pozos inyectoros (6103, 6538, 6264 y 6252).

3.2.5.2. Casos Evaluados

Para la evaluación del sistema de inyección se garantizará un consumo por pozo de 0,5825 mmscfd y se analizarán dos escenarios. El primero garantizar una presión de inyección en el cabezal de cada pozo de 2900 psig aproximadamente y en el segundo escenario regular la presión antes de cada múltiple de inyección, de manera de garantizar 2000 psig en cada pozo inyector.

3.2.5.3. Evaluación escenario 1

Para el balance de masas en los diferentes sistemas de tubería, se emplearon los caudales de inyección de gas y parámetros de operación (Piny) fijados. En este escenario se descarga el gas a 3000 psig y se transfiere a cada pozo inyector garantizando mínimo 2900 psig en el cabezal del mismo. En la tabla 33 se muestra la altura de cada pozo y en la tabla 34 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 33. Alturas de los pozos inyectoros.

Pozos Inyectoros	Altura (ft)	Altura (mts)
EA 5961	879	267,92
EA 6103	883	269,20
EA 7098	825	251,46
EA 5913	892	271,88
EA 6139	862	262,74
EA 6252	858	261,52
EA 6264	864	263,35
EA 6538	845	257,56

Fuente: Información de Petrobras Energía S.A.

Elaboración: Joel Tavera.

Tabla 34. Resultados del Modelo de Simulación líneas de Inyección EZA-04 - Esc 1.

Tramo	Dia (in)	Long. (m)	Caudal (mmscfd)	Pe (psig)	Ps (psig)	Temp (°F)	Velocidad (ft/s)	P/100 ft
Cab. Desc – Mult 1	2	30	2,3300	3000	2999	116,8	8,09	0,9479
Mult 1 - 7098	2	161	0,5825	2999	2999	112,2	1,98	0,6200
Mult 1 – 6139	2	807	0,5825	2999	2995	101,5	1,91	0,1759
Mult 1 - 5913	2	1087,2	0,5825	2999	2992	99,28	1,9	0,1981
Mult 1 - 5961	2	1444,4	0,5825	2999	2992	97,54	1,9	0,1981
Cab. Desc – Mult 2	2	2955	2,33	3000	2905	101,2	7,86	1,0613
Mult 2 - 6103	2	50	0,5825	2905	2905	100,7	1,96	0,0615
Mult 2 - 6252	2	547,7	0,5825	2905	2906	97,76	1,95	0,1293
Mult 2 - 6264	2	489	0,5825	2905	2905	97,97	1,95	0,0534
Mult 2 - 6538	2	789	0,5825	2905	2905	96,92	1,94	0,0615

Fuente: Elaboración propia.

3.2.5.4. Evaluación escenario 2

Para el balance de masas en los diferentes sistemas de tubería, se emplearon los caudales de inyección de gas y parámetros de operación (Piny) fijados. En este escenario se descarga el gas a 3000 psig y se regula la presión a cada múltiple de manera de garantizar a cada pozo inyector un mínimo de 2000 psig en el cabezal de los mismos. En la tabla 35 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 35. Resultados del Modelo de Simulación líneas de Inyección EZA-04 - Esc 2.

Tramo	Dia (in)	Long (m)	Caudal (mmscfd)	Pe (psig)	Ps (psig)	Temp (°F)	Velocidad (ft/s)	P/100 ft
Cab. Desc – Val. Reg. de presión	2	28	2,3300	3000	2999	116,80	8,00	0,9479
Val. Reg. de presión – Mult 1	2	2	2,3300	2007	2007	93,88	2,76	0,0853
Mult 1 - 7098	2	161	0,5825	2007	2006	94,11	2,76	0,0853
Mult 1 – 6139	2	807	0,5825	2007	2003	94,60	2,77	0,1665
Mult 1 - 5913	2	1087	0,5825	2007	2001	94,66	2,78	0,1816
Mult 1 - 5961	2	1444	0,5825	2007	2000	94,81	2,78	0,1816
Cab. Desc – Val. Reg. de presión	2	30	2,3300	3000	2999	116,80	1,93	0,0241
Val. Reg. de presión – Mult 2	2	2925	2,3300	2128	2001	93,51	10,69	1,3529
Mult 2 - 6103	2	50	0,5825	2001	2001	93,61	2,77	0,0854
Mult 2 - 6252	2	547	0,5825	2001	2001	94,40	2,78	0,0854
Mult 2 - 6264	2	489	0,5825	2001	2001	94,30	2,78	0,0854
Mult 2 - 6538	2	789	0,5825	2001	2000	94,58	2,78	0,0854

Fuente: Elaboración propia.

En ambos escenarios se observa una baja velocidad de gas (menor a $60 \frac{\text{pies}}{\text{s}}$) en la tubería y caídas de presión $< \frac{2 \text{ Psi}}{100 \text{ pie}}$, estos corresponden a un bajo flujo volumétrico de gas por estas líneas y arreglos de tuberías.

Capítulo 4

Análisis económico del proyecto

En el presente capítulo, se desarrollará el análisis financiero para la implementación del sistema de inyección de gas a alta presión para remover remanentes de petróleo.

Para tal fin, se detallará los costos de inversión (CAPEX), los costos operacionales (OPEX) y se determinará los ingresos que se obtendrían por la venta de los remanentes de crudo recuperados durante la operación del proyecto.

4.1. Presupuesto de inversión

El presupuesto de inversión estará conformado por los costos de suministros de materiales, equipos y construcción que a continuación se detallan:

4.1.1. Suministro de materiales

- Tuberías y accesorios.
- Válvulas manuales
- Válvulas de control
- Instrumentos
- Cables eléctricos
- Cables de control

4.1.2. Suministro de equipos

- Compresores de gas
- Depurador de gas de entrada V-01
- Filtro de gas combustible V-02
- Filtro de gas para instrumentos V-03
- Pulmón de gas para arranque V-04/V-05
- *Manifold* de planta
- *Manifold* de inyección

4.1.3. Costos de Construcción

- Obras civiles
- Obras mecánicas
- Obras eléctricas
- Obras de instrumentación

- Precomisionamiento
- Comisionamiento
- Puesta en marcha

A continuación se indican los costos de inversión para cada uno de los componentes del sistema de inyección de gas a alta presión:

CAPEX		
Item	Descripción	Monto - MUSD \$
A	Suministro de materiales	235
	Tuberías y accesorios.	60
	Válvulas manuales	15
	Válvulas de control	45
	Instrumentos	50
	Cables eléctricos	35
	Cables de control	30
B	Equipos	1395
	Compresores de gas	1200
	Depurador de gas de entrada V-01	45
	Filtro de gas combustible V-02	25
	Filtro de gas para instrumentos V-03	25
	Pulmón de gas para arranque V-04/v-05	30
	Manifold de planta	20
	Manifold de inyección	50
C	Construcción	1355
	Obras civiles	150
	Obras mecánicas	750
	Obras eléctricas	230
	Obras de instrumentación	190
	Precomisionamiento	8
	Comisionamiento	12
	Puesta en marcha	15
	Total	2985

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Costos de operación

Los costos por la operación del sistema de inyección estarán compuestos por los costos de personal operativo (planilla de remuneraciones del personal), costos de máquinas y herramientas (insumos) para la operación y los costos de mantenimiento de equipos, válvulas y demás facilidades que conforman el sistema.

A continuación se detallan los costos a incurrir en la operación del sistema:

OPEX		
Item	Descripción	Monto - USD/mes
A	Planilla de personal	4720
	Lider de operación	1622
	Operador mecánico	1032
	Operador eléctrico	1032
	Operador instrumentista	1032
B	Insumos	1290
	Camioneta	1200
	Herramientas	90
C	Mantenimiento	989
	Compresores de gas	300
	Depurador de gas de entrada V-01	130
	Filtro de gas combustible V-02	130
	Filtro de gas para instrumentos V-03	130
	Pulmón de gas para arranque V-04/v-05	80
	Manifold de planta	80
	Manifold de inyección	80
	Iluminación	59
	Total	6999

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Cálculo de ingresos

Los ingresos se obtendrán de la venta del hidrocarburo recuperado (barriles de petróleo) producto de la remoción de los remanentes de petróleo por el sistema de inyección de gas de alta presión.

Las premisas para determinar los ingresos son:

- Número de pozos afectados por la inyección de gas, en la zona denominada Laguna Zapotal, y que incrementarían su producción de petróleo: 200 pozos.
- Cantidad de barriles de petróleo (estimado) a obtener de la remoción de los remanentes en los reservorios de petróleo: 3 bpd.
- Precio venta del barril de petróleo: 20 dólares americanos.

Cálculo de la recuperación de remanentes de petróleo

- Diario:
 Volumen por día = 200 pozos x 3 barriles.
 Volumen por día = 600 barriles.
- Mensual:
 Volumen por mes = 200 pozos x 3 barriles x 30 días
 Volumen por mes = 18 000 barriles.

Cálculo de los ingresos

- Diario:
Ingreso diario = 600 barriles x 20 dólares / barril
Ingreso diario = 12 000 dólares.
- Mensual:
Ingreso mensual = 18 000 barriles x 20 dólares / barril
Ingreso mensual = 360 000 dólares.

4.4. Evaluación financiera

Datos de entrada:

Capex = USD 2 985 000

Ingresos mensuales = USD 360 000

Egresos mensuales = USD 6 940

Ingreso neto = USD (360 000 – 6 999) = USD 353 001

Cálculo del VAN

A continuación se muestra la relación de pagos mensuales por un periodo de 1 año con una tasa de interés mensual de 5%

Para el cálculo del VAN se ha considerado invertir 2,985,000 dólares americanos y tener ingresos mensuales de 353,001 dólares americanos, por un periodo de 12 meses, tal como se muestra a continuación:

Mes	Monto - USD
Inversión	-\$2,985,000
1	\$353,001
2	\$353,001
3	\$353,001
4	\$353,001
5	\$353,001
6	\$353,001
7	\$353,001
8	\$353,001
9	\$353,001
10	\$353,001
11	\$353,001
12	\$353,001
Tasa	VAN
5%	\$136,892

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

- La metodología empleada en el presente trabajo permitió definir, dimensionar, seleccionar y especificar los equipos requeridos por el sistema para inyección de gas a alta presión para remover remanentes de petróleo.
- Los resultados obtenidos en el dimensionamiento del sistema de recolección de gas no asociado confirman la factibilidad de viabilizar el uso de la producción de los pozos gasíferos; actualmente operando bajo la modalidad de desfogue, es decir, en forma intermitente.
- La implementación del sistema de inyección de gas a alta presión permitirá restituir la energía del reservorio, denominado Laguna Zapotal; y con ello, incrementar el factor de recuperación de hidrocarburo.
- Se logró dimensionar y seleccionar el filtro coalescente (V-02) para el sistema de gas combustible; asegurando que el suministro de gas al motor de combustión interna, esté dentro de las características recomendadas por el fabricante; y de esta manera, garantizar el buen funcionamiento del motor y tener alta confiabilidad del sistema.
- El dimensionamiento del pulmón de gas de arranque (V-04/V-05) se realizó siguiendo las recomendaciones del fabricante del motor Caterpillar G3508, es decir, en función al tiempo de impulso para el arranque; para dicho cálculo se consideró seis (06) intentos de arranque.
- Se logró dimensionar y seleccionar el filtro coalescente (V-03) para el sistema de gas a instrumentos; asegurando que el suministro de gas a todos los instrumentos no contenga partículas de agua y/o trazas de hidrocarburo (sea lo más seco posible); garantizando el buen funcionamiento de los sistemas instrumentados, sumando a la confiabilidad del sistema.
- El arreglo y dimensionamiento de tuberías para la inyección de gas, cumplen con los parámetros de operación (presión y temperatura) requeridos en el cabezal de los pozos inyectoros.
- La evaluación financiera del proyecto, confirmo ser un proyecto altamente rentable. Pues, el valor actual neto (VAN), calculado a 12 meses y con tasa de interés mensual de 5%, obtenido fue de USD 136 892 (positivo); es decir, la inversión se recuperaría en el primer año de funcionamiento.

Bibliografía

- API STD 12J. (1991). *“Specification for Oil and Gas Separators”* (Section 4. 17^a Ed.)
- API RP 14E. (2013). *“Recommended Practice for Design and Installation of Offshore Production Platform Piping Systems”* (Section 2.4. 15a Ed.)
- ANSI. *“American National Standards Institute”*.
- ASME B31.8. *“Gas Transmission and Distribution Piping Systems”*.
- ASTM. *“American Society for Testing Materials, ISA, Instrument Society of America”*.
- Compañía Pan American Energy. (2002). *“Manual de Producción”*.
- CANUSAWRAP. *“Corrosion Protection and Sealing”*.
- GPSA. (2004). *“Gas Processors Suppliers Association”* (12a Ed.).
- Perry Equipment Corporation. *“Gas Filtration Products”, Serie 85, 88, 90, “Gas Filter & Filter/Separators”*.
- Perry Equipment Corporation. *“Oil & Gas Vessels”, Serie 89, “Coalescing Filter”, “Absolute Separators”*.

Anexos

Anexos

Anexo A. Cromatografía del Gas

Tabla A1. Composición Molar del Gas de Laguna Zapotal

Componente	% Molar
Metano	0,9871
Etano	0,0040
Propano	0,0005
i-Butano	0,0001
n-Butano	0,0002
i-Pentano	0,0001
n-Pentano	0,0004
n-Hexano	0,0003
Nitrógeno	0,0038
CO ₂	0,0002
H ₂ S	-
Agua	0,0034
Total	1,0000
Peso molecular (lb/lb mol)	16,2300
Gravedad específica	0,5600
Poder Calorífico	N/D

Fuente: Cromatografía de Petrobras Energía S.A.

Elaboración: Joel Tavera.

Anexo B. Cálculo del factor de descarga (C_1) y factor de tamaño (C_2)

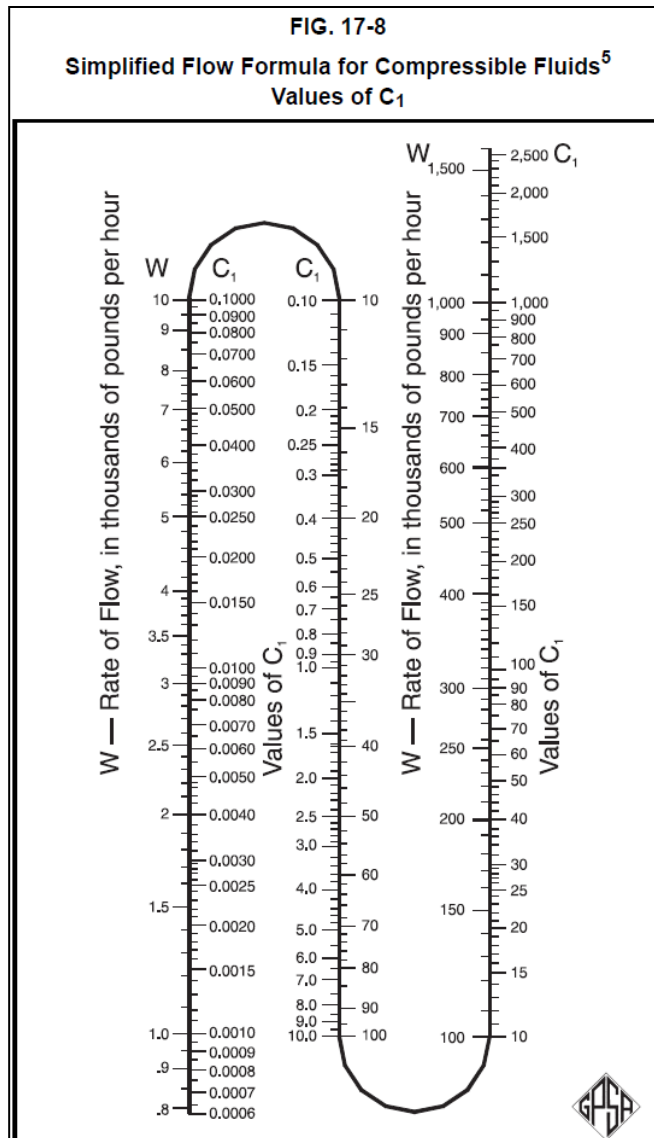


Figura B1. Cálculo del factor de descarga – C_1
 Fuente: *Engineering Data Book, 12th Ed, 2004* – GPCSA.

Anexo B. Cálculo del factor de descarga (C1) y factor de tamaño (C2) (continuación)

FIG. 17-9 Simplified Flow Formula for Compressible Fluids ⁵ Values of C ₂										
Nominal pipe size in.	Schedule number	Value of C ₂	Nominal pipe size in.	Schedule number	Value of C ₂	Nominal pipe size in.	Schedule number	Value of C ₂		
1/8	40 s	7 920 000.	8	20	0.133	18	10	0.002 47		
	80 x	26 200 000.		30	0.135		20	0.002 56		
	40 s	1 590 000.		40 s	0.146		... s	0.002 66		
80 x	4 290 000.	60		0.163	30		0.002 76			
3/8	40 s	319 000.		80 x	0.185		... x	0.002 87		
	80 x	718 000.		100	0.211		40	0.002 98		
	40 s	93 500.		120	0.252		60	0.003 35		
1/2	80 x	186 100.		140	0.289		80	0.003 76		
	160	430 000.		... xx	0.317		100	0.004 35		
	... xx	11 180 000.		160	0.333		120	0.005 04		
3/4	40 s	21 200.	10	20	0.039 7	20	10	0.001 41		
	80 x	36 900.		30	0.042 1		20 s	0.001 50		
	160	100 100.		40 s	0.044 7		30 x	0.001 61		
... xx	627 000.	60 x		0.051 4	40		0.001 69			
1	40 s	5 950.		80	0.056 9		60	0.001 91		
	80 x	9 640.		100	0.066 1		80	0.002 17		
	160	22 500.		120	0.075 3		100	0.002 51		
... xx	114 100.	140		0.090 5	120		0.002 87			
1 1/4	40 s	1 408.		160	0.105 2		140	0.003 35		
	80 x	2 110.		12	20		0.015 7	24	10	0.000 534
	160	3 490	30		0.016 8	20 s	0.000 565			
... xx	13 640.	... s	0.017 5		... x	0.000 597				
1 1/2	40 s	627.	40		0.018 0	30	0.000 614			
	80 x	904.	... x		0.019 5	40	0.000 651			
	160	1 656.	60		0.020 6	60	0.000 741			
... xx	4 630.	80	0.023 1		80	0.000 835				
2	40 s	169.	100		0.026 7	100	0.000 972			
	80 x	236.	120		0.031 0	120	0.001 119			
	160	488.	140		0.035 0	140	0.001 274			
... xx	899.	160	0.042 3	160	0.001 478					
2 1/2	40 s	66.7	14	10	0.009 49	30	10	0.0001681		
	80 x	91.8		20	0.009 96		... s	0.0001719		
	160	146.3		30 s	0.010 46		20 xs	0.0001797		
... xx	380.0	40		0.010 99	30		0.0001879			
3	40 s	21.4		... x	0.011 55		36	10	0.0000642	
	80 x	28.7		60	0.012 44			... s	0.0000654	
	160	48.3		80	0.014 16			20 xs	0.0000678	
... xx	96.6	100		0.016 57	30			0.0000704		
3 1/2	40 s	10.0		120	0.018 98			16	10	0.004 63
	80 x	13.2		140	0.021 8				20	0.004 83
	160	5.17	160	0.025 2	30 s	0.005 04				
4	40 s	5.17	16	40 x	0.005 49	36			... s	0.0000731
	80 x	6.75		60	0.006 12				10	0.007 00
	120	8.94		80	0.007 00				20	0.008 04
160	11.80	100		0.008 04	30		0.009 26			
... xx	18.59	120		0.009 26	140		0.010 99			
5	40 s	1.59		160	0.012 44		6		40 s	0.610
	80 x	2.04		8	20				0.133	80 x
	120	2.69			30			0.135	120	1.015
160	3.59	40 s			0.146			160	1.376	
... xx	4.93	60			0.163			... xx	1.861	
6	40 s	0.610	80 x		0.185	10		20	0.039 7	
	80 x	0.798	100		0.211			30	0.042 1	
	120	1.015	120		0.252			40 s	0.044 7	
160	1.376	140	0.289		60 x			0.051 4		
... xx	1.861	160	0.333		80			0.056 9		
8	40 s	5 950.	12		20		0.015 7	20	10	0.001 41
	80 x	9 640.		30	0.016 8		20 s		0.001 50	
	160	22 500.		... s	0.017 5		30 x		0.001 61	
... xx	114 100.	40		0.018 0	40		0.001 69			
1 1/4	40 s	1 408.		... x	0.019 5		60		0.001 91	
	80 x	2 110.		60	0.020 6	80	0.002 17			
	160	3 490		80	0.023 1	100	0.002 51			
... xx	13 640.	100		0.026 7	120	0.002 87				
1 1/2	40 s	627.		120	0.031 0	140	0.003 35			
	80 x	904.		140	0.035 0	160	0.003 85			
	160	1 656.	160	0.042 3	24	10	0.000 534			
... xx	4 630.	14	10	0.009 49		20 s	0.000 565			
2	40 s		169.	20		0.009 96	... x	0.000 597		
	80 x		236.	30 s		0.010 46	30	0.000 614		
	160		488.	40		0.010 99	40	0.000 651		
... xx	899.		... x	0.011 55		60	0.000 741			
2 1/2	40 s		66.7	60		0.012 44	80	0.000 835		
	80 x		91.8	80		0.014 16	100	0.000 972		
	160		146.3	100		0.016 57	120	0.001 119		
... xx	380.0		120	0.018 98		140	0.001 274			
3	40 s		21.4	140	0.021 8	160	0.001 478			
	80 x	28.7	160	0.025 2	30	10	0.0001681			
	160	48.3	16	10		0.004 63	... s	0.0001719		
... xx	96.6	20		0.004 83		20 xs	0.0001797			
3 1/2	40 s	10.0		30 s		0.005 04	30	0.0001879		
	80 x	13.2		40 x		0.005 49	36	10	0.0000642	
	160	5.17		60		0.006 12		... s	0.0000654	
... xx	96.6	80		0.007 00		20 xs		0.0000678		
4	40 s	5.17		100		0.008 04		30	0.0000704	
	80 x	6.75		120		0.009 26		40	0.0000731	
	120	8.94		140		0.010 99		Note: The letters s, x, and xx in the columns of Schedule Numbers indicate Standard, Extra Strong, and Double Extra Strong pipe respectively.		
160	11.80	160		0.012 44						
... xx	18.59									
5	40 s	1.59								
	80 x	2.04								
	120	2.69								
160	3.59									
... xx	4.93									
6	40 s	0.610								
	80 x	0.798								
	120	1.015								
160	1.376									
... xx	1.861									

Figura B2. Cálculo del factor de tamaño – C2.

Fuente: *Engineering Data Book, 12th Ed, 2004 – GPSA.*

Anexo C. Longitudes equivalentes de tuberías y accesorios

FIG. 17-4
Equivalent Length of Valves and Fittings in Feet

Nominal Pipe size in.	Globe valve or ball check valve	Angle valve	Swing check valve	Plug cock	Gate or ball valve	45° ell		Short rad. ell		Long rad. ell		Hard T		Soft T		90° miter bends			Enlargement					Contraction						
						Welded	Threaded	Welded	Threaded	Welded	Threaded	Welded	Threaded	Welded	Threaded	Welded	Threaded	2 miter	3 miter	4 miter	Sudden		Std. red.			Sudden		Std. red.		
																					d/D = 1/4	d/D = 1/2	d/D = 3/4	d/D = 1/2	d/D = 3/4	d/D = 1/4	d/D = 1/2	d/D = 3/4	d/D = 1/2	d/D = 3/4
						Equiv. L in terms of small d																								
1½	55	26	13	7	1	1	2	3	5	2	3	8	9	2	3				5	3	1	4	1	3	2	1	1	-		
2	70	33	17	14	2	2	3	4	5	3	4	10	11	3	4				7	4	1	5	1	3	3	1	1	-		
2½	80	40	20	11	2	2	3	5	3	3	4	12	13	3	4				8	5	2	6	2	4	3	2	2	-		
3	100	50	25	17	2	2	3	6	4	4	5	14	15	4	5				10	6	2	8	2	5	4	2	2	-		
4	130	65	32	30	3	3	4	7	5	5	6	19	20	5	6				12	8	3	10	3	6	5	3	3	-		
6	200	100	48	70	4	4	5	11	8	8	9	28	29	8	9				18	12	4	14	4	9	7	4	4	1		
8	260	125	64	120	6	6	6	15	9	9	10	37	38	9	10				25	16	5	19	5	12	9	5	5	2		
10	330	160	80	170	7	7	7	18	12	12	13	47	48	12	13				31	20	7	24	7	15	12	6	6	2		
12	400	190	95	170	9	9	9	22	14	14	15	55	56	14	15				37	24	8	28	8	18	14	7	7	2		
14	450	210	105	80	10	10	10	26	16	16	17	62	63	16	17				42	26	9	-	-	20	16	8	-	-		
16	500	240	120	145	11	11	11	29	18	18	19	72	73	18	19				47	30	10	-	-	24	18	9	-	-		
18	550	280	140	160	12	12	12	33	20	20	21	82	83	20	21				53	35	11	-	-	26	20	10	-	-		
20	650	300	155	210	14	14	14	36	23	23	24	90	91	23	24				60	38	13	-	-	30	23	11	-	-		
22	688	335	170	225	15	15	15	40	25	25	26	100	101	25	26				65	42	14	-	-	32	25	12	-	-		
24	750	370	185	254	16	16	16	44	27	27	28	110	111	27	28				70	46	15	-	-	35	27	13	-	-		
30	-	-	-	312	21	21	21	55	40	40	41	140	141	40	41															
36	-	-	-	-	25	25	25	66	47	47	48	170	171	47	48															
42	-	-	-	-	30	30	30	77	55	55	56	200	201	55	56															
48	-	-	-	-	35	35	35	88	65	65	66	220	221	65	66															
54	-	-	-	-	40	40	40	99	70	70	71	250	251	70	71															
60	-	-	-	-	45	45	45	110	80	80	81	260	261	80	81															

Figura C1. Cálculo de las longitudes equivalentes.
Fuente: *Engineering Data Book, 12th Ed, 2004* – GPSA.

Anexo D. Constantes para el Dimensionamiento de Separadores

Tabla D1. K = Separadores con extractores tipo neblina

Tipo de Separador	K (ft/s)	C (ft/hr)
Horizontal	0,40 – 0,50	1440 – 1800
Vertical	0,18 – 0,35	650 – 1260
Esférico	0,20 -0,35	720 – 1260
Vapor Húmedo	0,25	900
Evaporadores	0,20	720
Vacío	0,15	540
Valor de ajuste de K y C , correspondiente a la presión de operación, % del valor de diseño		
Atmosférica		100
150 psi		90
300 psi		85
600 psi		80
1150 psi		75

Fuente: *Engineering Data Book, 12th Ed, 2004* – GPSA.
Elaboración: Joel Tavera.

Para el caso de dimensionamiento de separadores verticales sin extractores tipo neblina, se utilizan los valores de K y C mostrados, divididos por 2.

Anexo E. Tiempo de retención del líquido en el recipiente.

Tabla E1. Tiempo de retención

G. E del Crudo	Minutos
< 0,85	1
0,85 – 0,93	1 a 2
0,93 – 1,0	2 a 4

Fuente: API 12J, 15th, 1991.

Elaboración: Joel Tavera.

Anexo F. Factor de compresibilidad (Z).

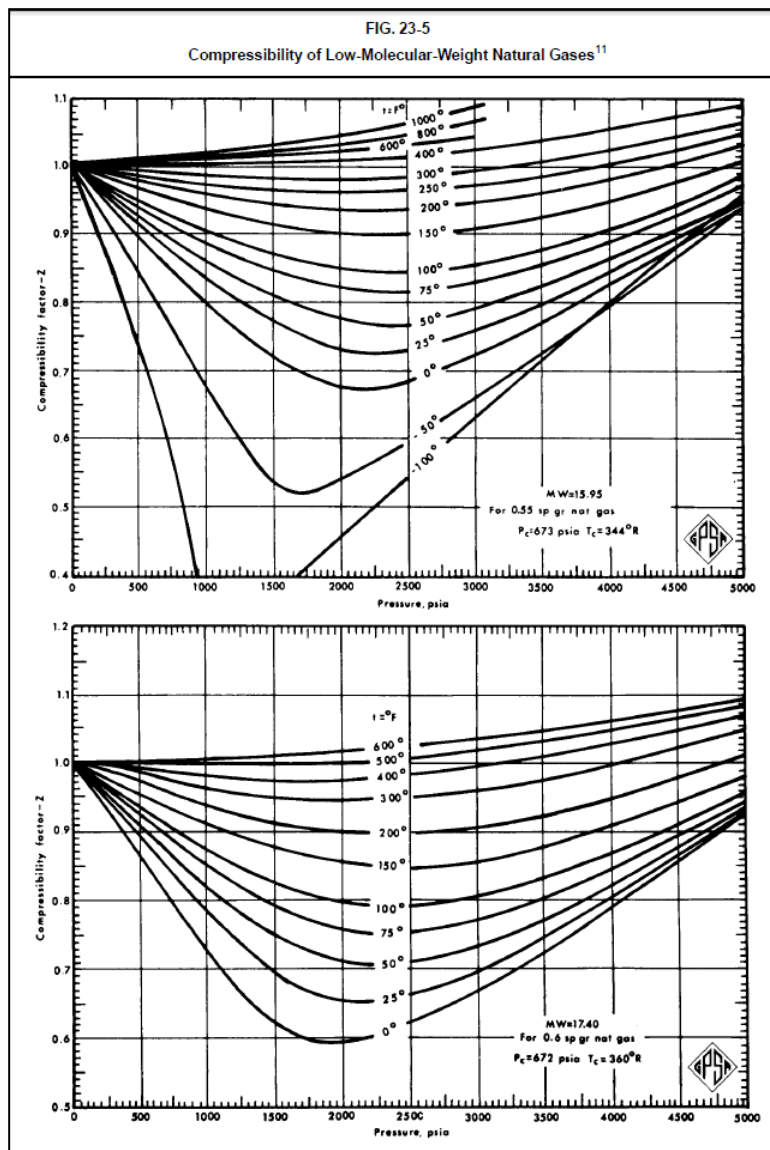


Figura F1. Cálculo del factor de compresibilidad.

Fuente: *Engineering Data Book, 12th Ed, 2004* – GPSA.

Anexo F. Factor de compresibilidad (Z). (Continuación)

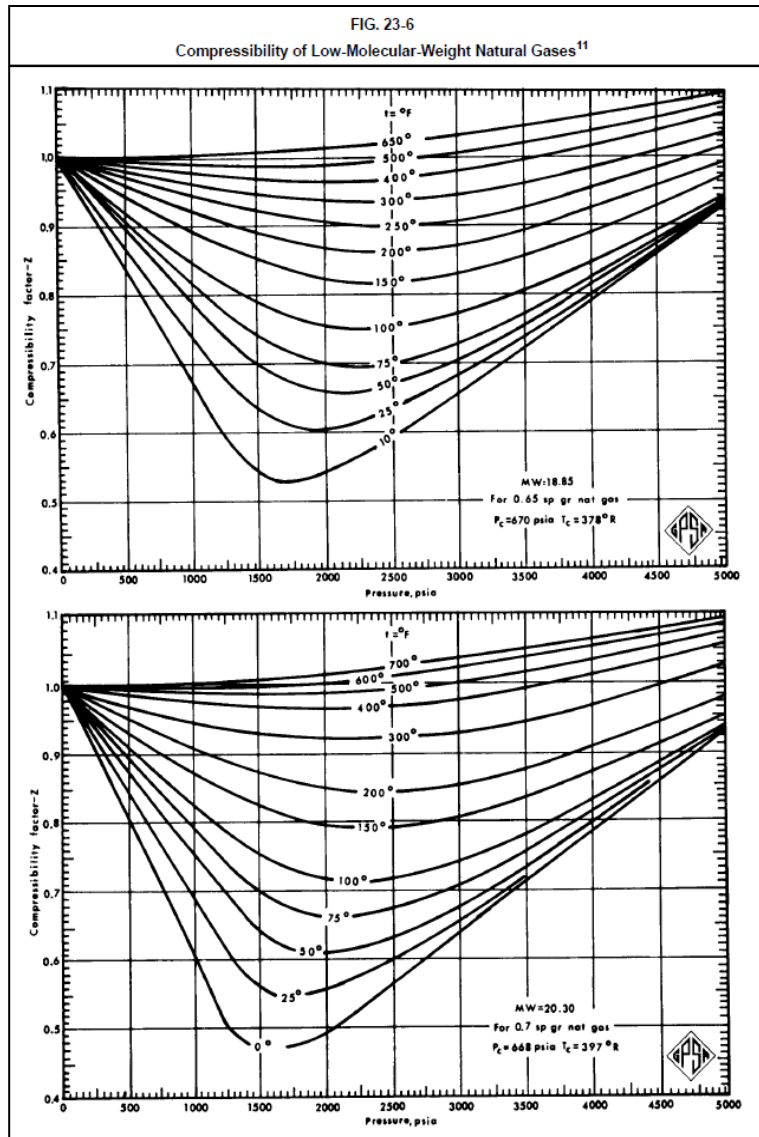


Figura F2. Cálculo del factor de compresibilidad.

Fuente: *Engineering Data Book, 12th Ed, 2004* – GPSA.

Anexo F. Factor de compresibilidad (Z). (Continuación)

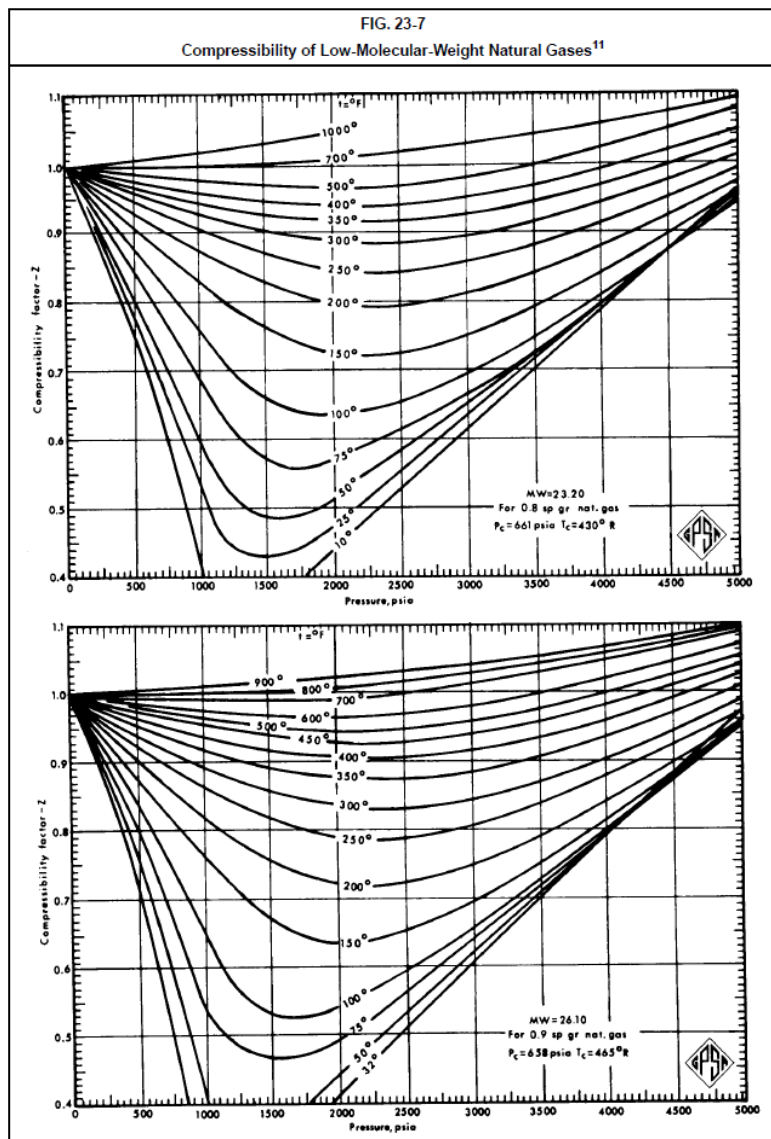


Figura F3. Cálculo del factor de compresibilidad.

Fuente: *Engineering Data Book, 12th Ed, 2004* – GPSA.

Anexo G. Gráfico para Selección de Filtros.

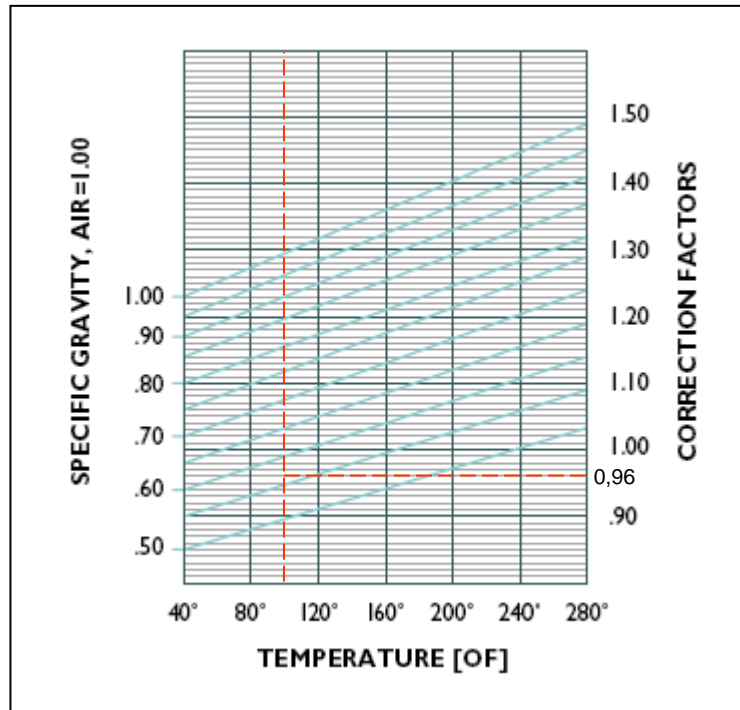


Figura G1. Factor de corrección de la gravedad específica.
Fuente: Perry Equipment Corporation (PECO).

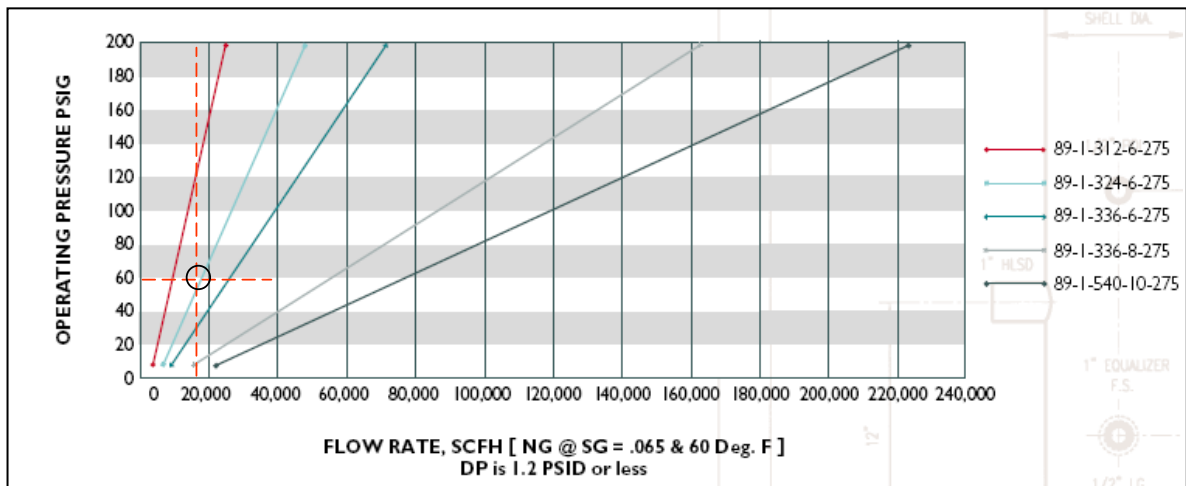


Figura G2. Flow rate
Fuente: Perry Equipment Corporation (PECO).

Anexo H. Esquemático de las líneas de recolección e inyección, validación del modelo

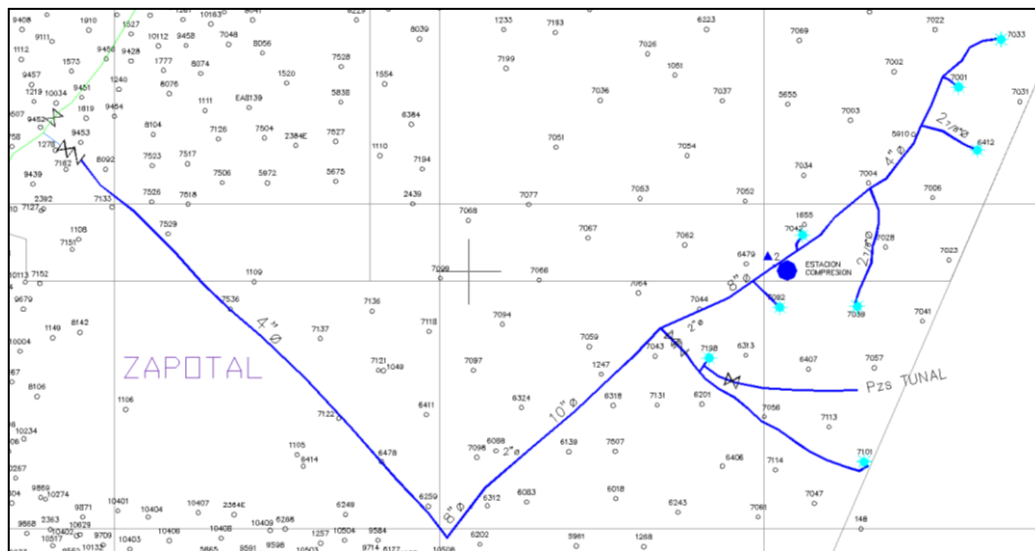


Figura H1. Esquema de líneas de recolección
Fuente: Elaboración propia.

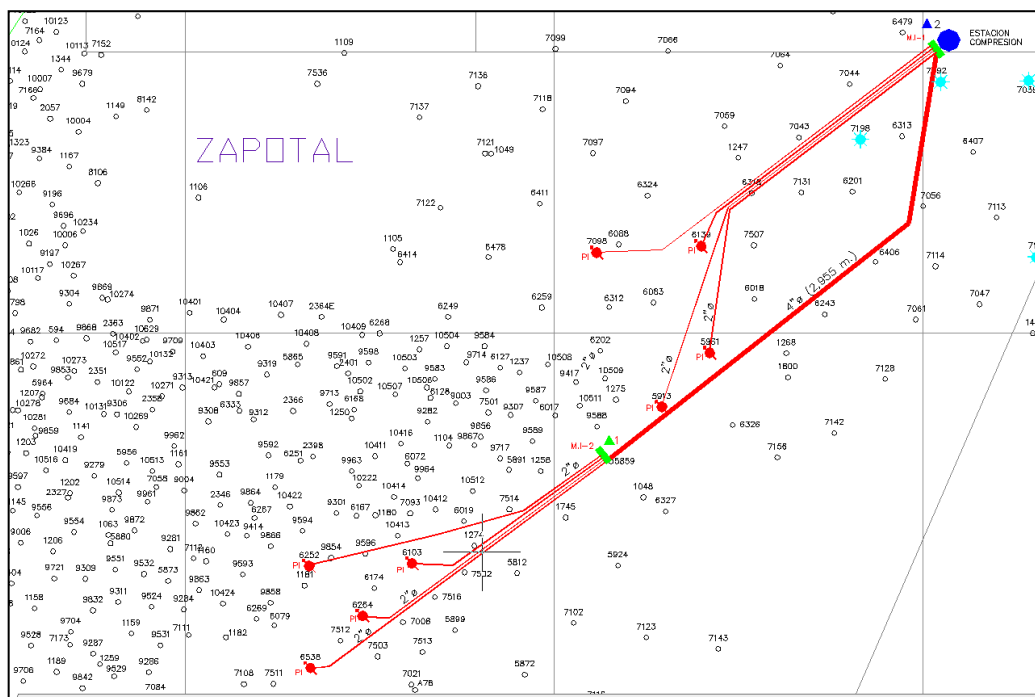


Figura H2. Esquema de líneas de inyección.
Fuente: Elaboración propia.

Anexo I. Planos

Anexo I1. Plano 1 - Sistema de Inyección de Gas

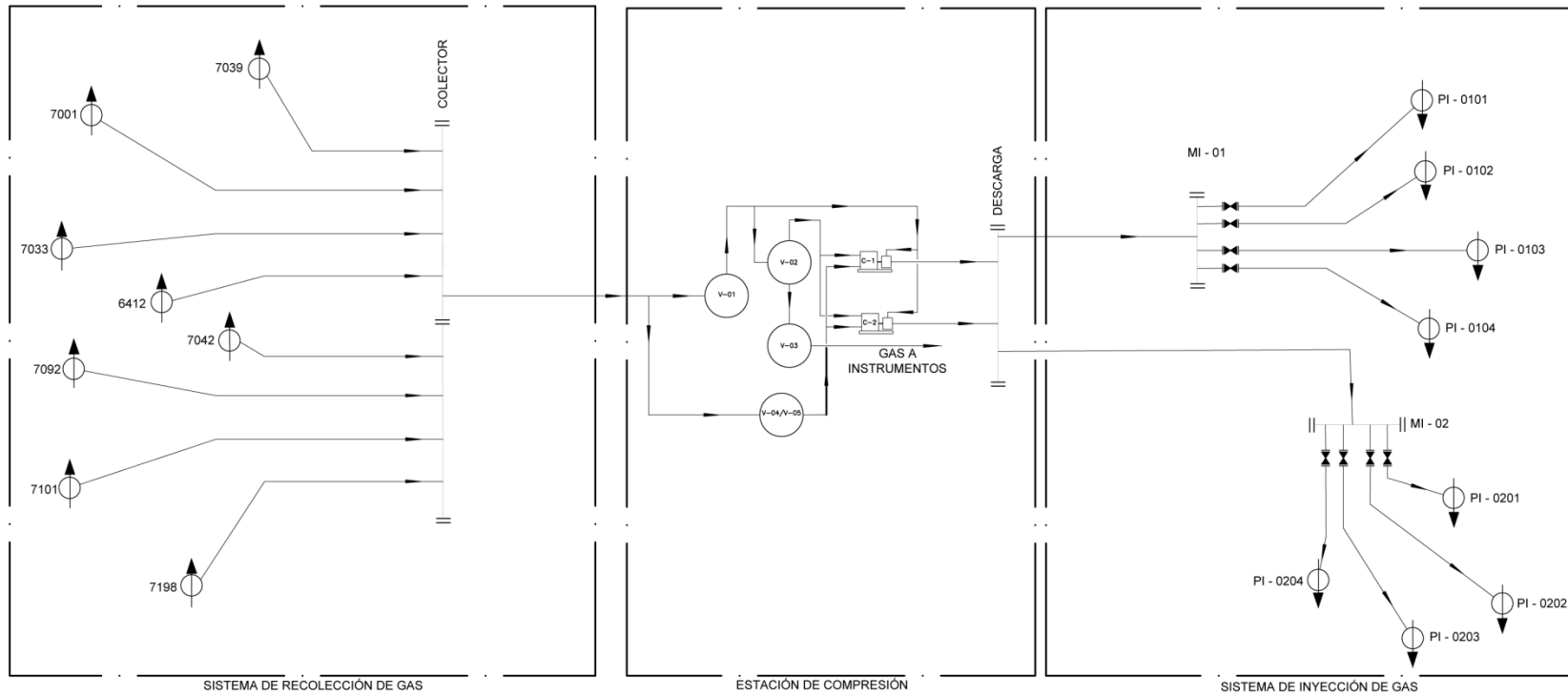
Anexo I2. Plano 2 - Diagrama de Flujo de Proceso

Anexo I3. Plano 3 - Arreglo General

Anexo I4. Plano 4 - Fabricación Depurador de Gas de Entrada (V-01). Hoja 1/2

Anexo I4. Plano 4 - Fabricación Depurador de Gas de Entrada (V-01). Hoja 2/2

Anexo I5. Plano 5 - Fabricación de Pulmón de Gas de Arranque



LEYENDA	
	POZO PRODUCTOR
	POZO INYECTOR
MI	MANIFOLD DE INYECCIÓN

V-01
DEPURADOR GAS
DE ENTRADA

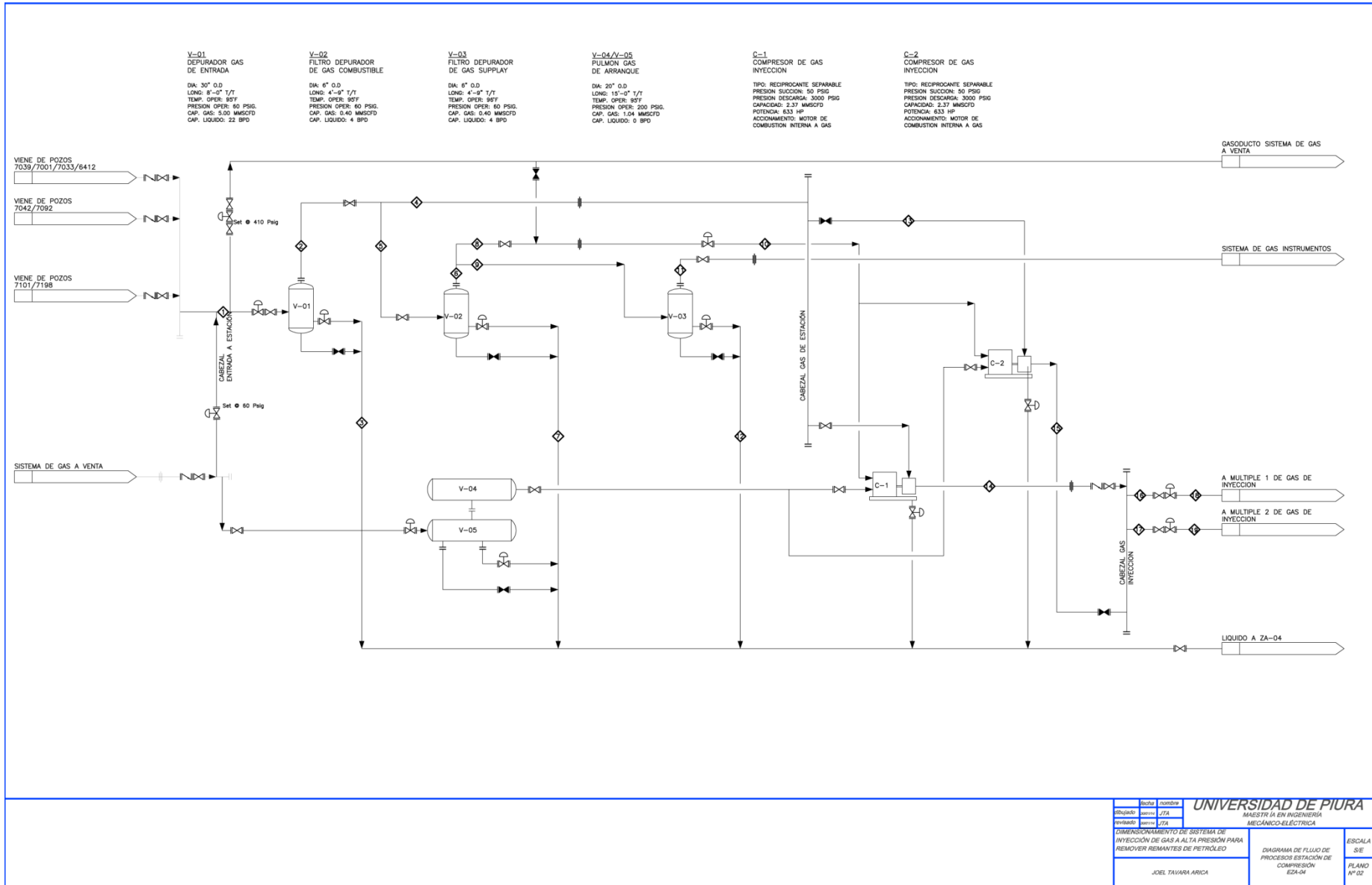
V-02
FILTRO DEPURADOR
DE GAS COMBUSTIBLE

V-03
FILTRO DEPURADOR
DE GAS SUPPLY

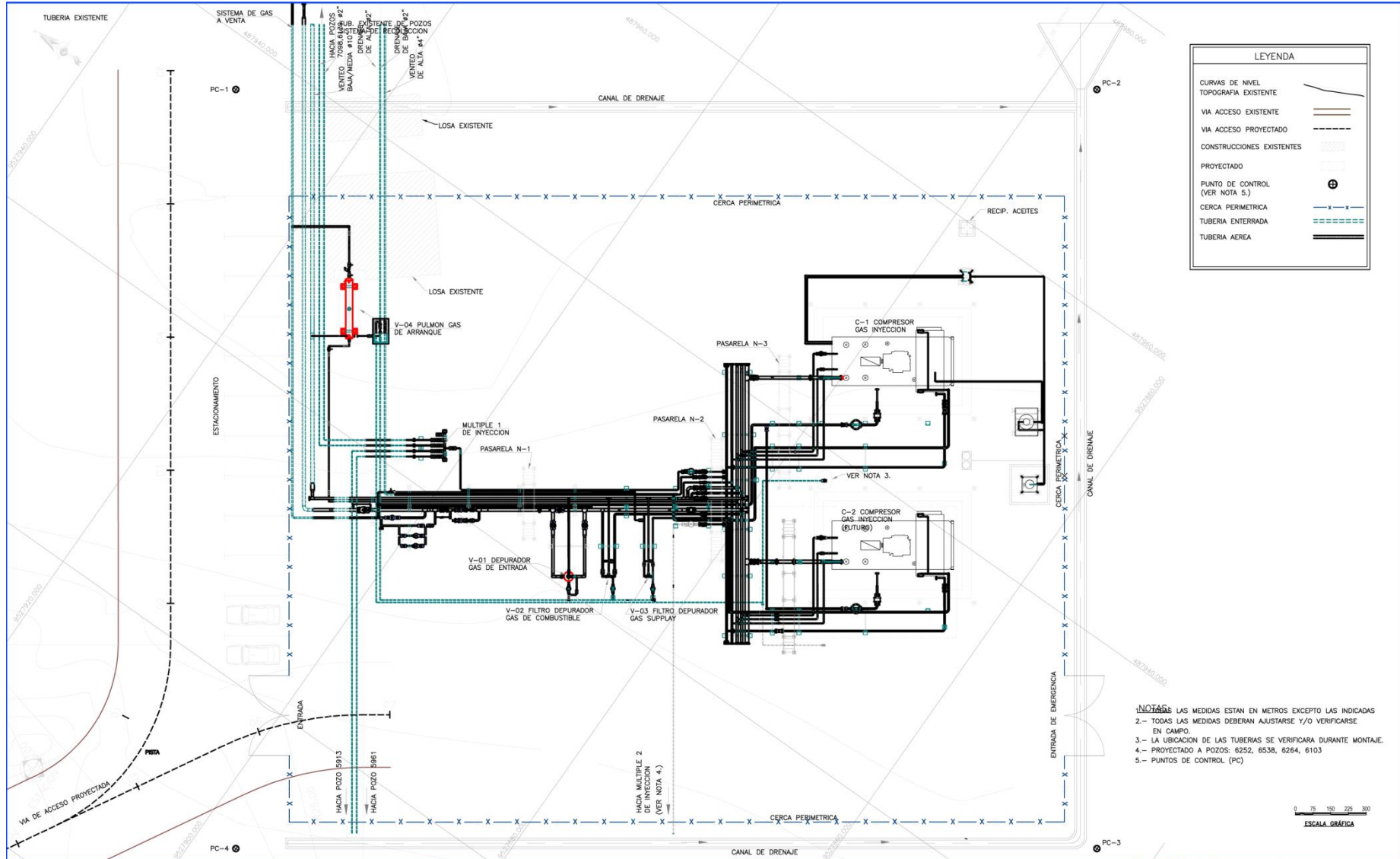
V-04/V-05
PULMON GAS
DE ARRANQUE

C-1/ C-2
COMPRESOR DE GAS
INYECCION

Fecha	Nombre	UNIVERSIDAD DE PIURA MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICO-ELECTRICA
Elaborado	JTA	
Revisado	JTA	
DISEÑO Y DESARROLLO DE SISTEMA DE INYECCIÓN DE GAS A ALTA PRESIÓN PARA REMOVER REMANENTES DE PETRÓLEO		SISTEMA DE INYECCIÓN DE GAS CASO DE ESTUDIO: LAGUNA ZAPOTAL
JOEL TAVARA ARICA		ESCALA SE PLANO N° 01



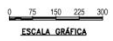
Notas	Comentarios	UNIVERSIDAD DE PIURA	
Elaborado	LTA	MAESTRIA EN INGENIERIA	
Revisado	LTA	MECANICO-ELECTRICA	
DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMA DE INYECCION DE GAS A ALTA PRESION PARA REMOVER REMANENTES DE PETROLEO		DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESOS ESTACION DE COMPRESION	ESCALA S/E
JOEL TAVARA ARICA		ESA-04	PLANO N°02



LEYENDA

CURVAS DE NIVEL TOPOGRAFIA EXISTENTE	
VIA ACCESO EXISTENTE	
VIA ACCESO PROYECTADO	
CONSTRUCCIONES EXISTENTES	
PROYECTADO	
PUNTO DE CONTROL (VER NOTA 5.)	
CERCA PERIMETRICA	
TUBERIA ENTERRADA	
TUBERIA AEREA	

- NOTAS:**
- 1.- LAS MEDIDAS ESTAN EN METROS EXCEPTO LAS INDICADAS
 - 2.- TODAS LAS MEDIDAS DEBERAN AJUSTARSE Y/O VERIFICARSE EN CAMPO.
 - 3.- LA UBICACION DE LAS TUBERIAS SE VERIFICARA DURANTE MONTAJE.
 - 4.- PROYECTADO A POZOS: 6252, 6538, 6264, 6103
 - 5.- PUNTOS DE CONTROL (PC)



fecha	nombre	UNIVERSIDAD DE PIURA MAESTRIA EN INGENIERIA MECANICO - ELECTRICA	85
dibujado	JTA		
revisado	JTA		
DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMA DE INYECCION DE GAS A ALTA PRESION PARA REMOVER REMANENTES DE PETROLEO		ARREGLO GENERAL ESTACION DE COMPRESION EZA-04	ESCALA INDICADA
JOEL TAVARA ARICA			PLANO N° 03

PLANTA
ESC. 1:10

ELEVACION
ESC. 1:10

SECCION A-A
ESC. 1:7.5

SECCION D-D
ESC. 1:7.5

SECCION E-E
ESC. 1:7.5

SECCION B-B
ESC. 1:7.5

VISTA C-C
ESC. 1:7.5

DETALLE Q
ESC. 1:5

DETALLE M
ESC. 1:5

DETALLE N
ESC. 1:5

DETALLE-O
ESC. 1:5

DETALLE-P
ESC. 1:2

NOTAS:

- TODAS LAS MEDIDAS ESTAN EN MILIMETROS EXCEPTO LAS INDICADAS.
- TODAS LAS SUPERFICIES DE FIERRO DEBEN SER ARENADAS A METAL BLANCO SEGUN NORMA SSPC-SP.5 Y RECUBIERTA CON PINTURA ANTICORROSIONA EPOXICA CON UN E.P.S. DE 8 mm Y PINTURA DE ACABADO CON E.P.S. DE 2 mm.
- CONSIDERAR ACCESORIOS:
 - MANOMETRO CON GLICERINA 0-150 psi.
 - TERMOMETRO 0-100°C CON TERMOPOZO #1/2".
 - VALVULA DE ALWJO #1 1/2"-2" SET. ● 55-56 pag.

ITEM	CANTIDAD	DESCRIPCION	MATERIAL	SERIE	NORMA	EXTREMO	OBSERVACIONES
24	1	PL 5/16"x120x300	CS		ASTM A36		
23	1	PL 5/16"x300x400	CS		ASTM A36		
22	20	PERNO 1/2"x3" G8/ARANDELA/TUERCA	CS				
21	6	THREAOLETS 2"x1/2"	CS				
20	3	THREAOLETS 2"x1"	CS				
19	1	DEMISTER	SS 304				
18	1	PL 1/4"x80x170	CS		ASTM A36		
17	2	CODO 90° Ø2" SCH40	CS		ASTM A53	SOLD	
16	1	NIPL 02"x150 SCH40	CS		ASTM A53	SOLD	
15	1	TUBO Ø2"x350 SCH40	CS		ASTM A53		
14	1	TUBO Ø2"x345 SCH40	CS		ASTM A53		
13	2	NIPL 08"x150 SCH40	CS		ASTM A53	SOLD	
12	1	NIPL 01 1/2"x60 SCH40	CS		ASTM A53	SOLD	
11	1	PL 3/4"x740x740	CS		ASTM A36		
10	1	PL 1/2"x220x1680	CS		ASTM A36		
9	1	PL 3/8"x600x600	CS		ASTM A36		
8	3	PL 3/8"x110x110	CS		ASTM A36		
7	2	PL 3/8"x250x250	CS		ASTM A36		
6	1	BRIDA Ø1 1/2" WN N°150	CS		ANSI B16.5		
5	2	BRIDA Ø6" WN N°150	CS		ANSI B16.5		
4	2	BRIDA Ø2" WN N°150	CS		ANSI B16.5		
3	1	PL 1/2"x780x780	CS		ASTM A36		
2	1	PL 5/16"x500x2080	CS		ASTM A36		
1	1	PL 3/8"	CS		ASTM A36		

UNIVERSIDAD DE PIURA
MAESTRIA EN INGENIERIA MECANICO-ELECTRICA

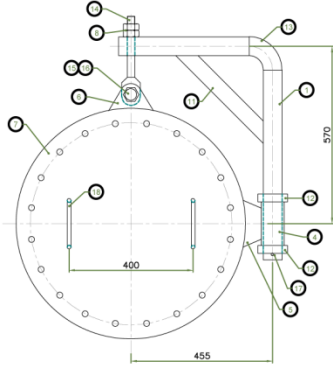
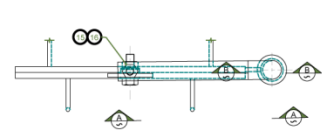
DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMA DE INYECCION DE GAS A ALTA PRESION PARA REMOVER REMANENTES DE PETROLEO

FABRICACION DE DEPURADOR DE GAS DE ENTRADA V-01

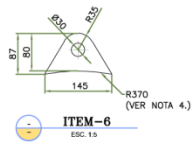
JOEL TAVARRICA

ESCALA: INDICADA

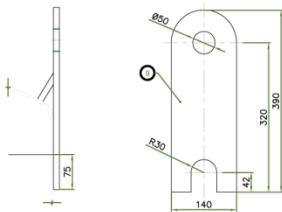
PLANO N° 04



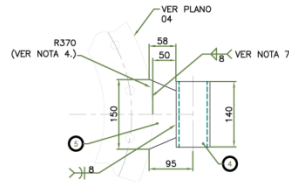
MAN-HOLE
ESC. 17.5



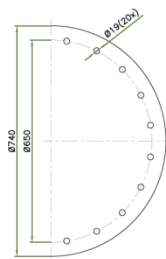
ITEM-6
ESC. 15



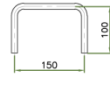
IZADOR
ESC. 15



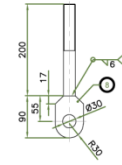
SECCIÓN B-B
ESC. 17.5



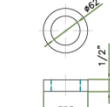
ITEM-7
ESC. 17.5



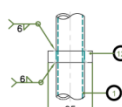
ITEM-18
ESC. 10



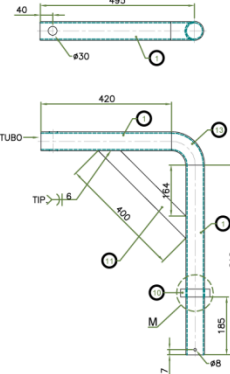
ITEM-14
ESC. 15



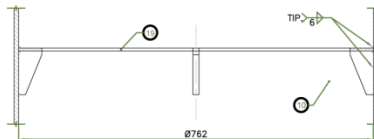
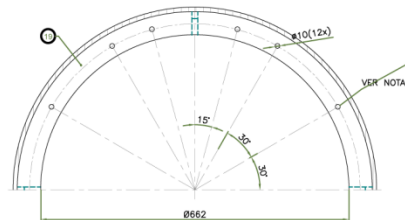
ITEM-12
ESC. 15



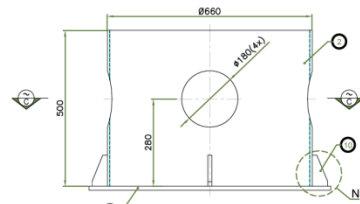
DETALLE-M
ESC. 17.5



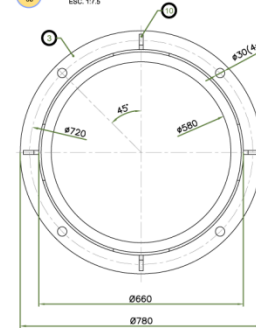
SECCIÓN A-A
ESC. 17.5



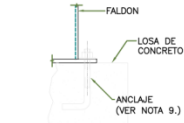
SOPORTE DEMISTER
ESC. 15



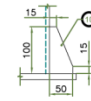
BASE
ESC. 17.5



SECCIÓN C-C
ESC. 17.5



ANCLAJE
ESC. 15



DETALLE-N
ESC. 15

NOTAS:

1. TODAS LAS MEDIDAS ESTAN EN MILIMETROS EXCEPTO LAS INDICADAS.
2. TODO EL ACERO ESTRUCTURAL DEBERA CUMPLIR CON LA NORMA ASTM A36.
3. TODAS LAS SOLDADURAS DEBERAN SER REALIZADAS CON LOS ELECTRODOS CORRESPONDIENTES AL MATERIAL, SERIE AWS E70, NORMA AWS A-5.1.
4. EL RADIO PARA LOS ITEMS (5) Y (6) VIENEN DEL BORDE EXTERIOR DE LA BRIDA DE MANHOLE.
5. SOLDAR UNA PIEZA DEL ITEM (13) COMO INDICA EL DETALLE-N. LA OTRA PIEZA DEBE ESTAR LIBRE.
6. TODAS LAS SUPERFICIES DE FIERRO DEBEN SER ARENADOS A METAL BLANCO, SEGUN NORMA SSPQ-SP-5 Y RECUBIERTA CON PINTURA ANTICORROSION EPOXICA CON E.P.S. DE 8mm Y PINTURA DE ACABADO CON E.P.S. DE 2 mm.
7. SOLDAR ITEM 5 A BRIDA DE MAN-HOLE COMO SE MUESTRA.
8. AGUJEROS PARA SUELDON DE DEMISTER.
9. VER UBICACION DE ANCLAJES EN PLANO: HLG-1-D-150108-13-002

ITEM	CANTIDAD	DESCRIPCION	MATERIAL	SERIE	NORMA	EXTREMO	OBSERVACIONES
19	1	PL 1/4"x800x800	CS		ASTM A36		
18	2	FIERRO LISO Ø1/2"x400	CS				
17	1	PASADOR Ø1/4"x4"	CS				
16	3	TUERCA Ø1", ARANDELA PLANA	CS				
15	1	PERNO Ø1"x4" G8	CS				
14	1	PERNO Ø1"x12" G8	CS				
13	1	CODO 90° Ø2" SCH40	CS		ASTM A53		SOLD
12	2	PL 1/2"x95x95	CS		ASTM A36		
11	1	FT 1/4"x2"x400	CS		ASTM A36		
10	4	PL 1/2"x50x100	CS		ASTM A36		
9	2	PL 1/2"x140x390	CS		ASTM A36		
8	1	PL 3/4"x60x90	CS		ASTM A36		
7	1	PL 3/4"x740x740	CS		ASTM A36		
6	2	PL 1/2"x80x150	CS		ASTM A36		
5	1	PL 3/4"x80x150	CS		ASTM A36		
4	1	TUBO Ø2 1/2" SCH40	CS		ASTM A53		
3	1	PL 1/2"x780x780	CS		ASTM A36		
2	1	PL 5/16"x500x2080	CS		ASTM A36		
1	1	TUBO Ø2" SCH40	CS		ASTM A53		

UNIVERSIDAD DE PIURA
PROGRAMA PROFESIONAL DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA-ELECTRICA

DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMA DE INYECCION DE GAS A ALTA PRESION PARA REMOVER REMANENTES DE PETROLEO

FABRICACION DE DEPURADOR DE GAS DE ENTRADA V-01
DETALLES-HOJAS 2/2

JOEL TAVARA ARICA

ESCALA: INDICADA
PLANO Nº 04

