

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**

## **FACULTAD DE INGENIERIA DE PETROLEO, GAS NATURAL Y PETROQUIMICA**



**“REDUCCION DE LA PRESION EN EL ANULAR DE POZOS DE  
BOMBEO MECANICO CON COMPRESORES DE VIGA BALANCIN”**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE  
PETROLEO**

**Reynaldo A. Rojas Padilla**

**Promoción : 88-II**

**LIMA, PERU - 2008**

## **CONTENIDO**

### **CAPITULO I      INTRODUCCIÓN**

- 1.1.- Objetivo
- 1.2.- Sumario
- 1.3.- Antecedentes

### **CAPITULO II      FUNDAMENTO TEORICO**

- 2.1.- Descripción general del Sistema de Producción
- 2.2.- Sistema de Producción Artificial Bombeo Mecánico
- 2.3.- Incremento de Productividad de los Pozos Aplicando Vacío en el Anular
- 2.4.- Aspectos prácticos de Bombeo Mecánico con Presión al Vacío en el Anular
- 2.5.- Aspectos de Operación del Compresor de Viga Balancín (CGB)
- 2.6.- Flujo en Tuberías y Restricciones

### **CAPITULO III      FUNDAMENTOS DE DISEÑO DEL CGB**

- 3.1.- Determinación del tamaño del compresor
- 3.2.- Cálculo de la potencia adicional
- 3.3.- Efecto de las cargas en los componentes del compresor
- 3.4.- Efecto de la temperatura en los componentes del compresor
- 3.5.- Determinación del diámetro del vástago
- 3.6.- Nomenclatura o denominación del compresor

### **CAPITULO IV      PROYECTO PILOTO**

- 4.1.- Descripción del Proyecto Piloto
- 4.2.- Características generales de los pozos
- 4.3.- Características de Reservorios y de fluidos
- 4.4.- Estimación del Índice de Productividad y de la producción incremental por reducción de la presión de forros
- 4.5.- Cálculos de diseño del Compresor Viga Balancín (CGB)
- 4.6.- Resultados del Proyecto piloto

## **CAPITULO V      PROYECTO PROPUESTO**

- 5.1. Alcance del proyecto
- 5.2. Criterios de selección
- 5.3. Planteamiento del proyecto
- 5.4. Evaluación económica
- 5.5. Análisis de sensibilidad

## **CAPITULO VI      CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

- 6.1. Conclusiones
- 6.2. Recomendaciones

Bibliografía e información Técnica

ANEXOS

Cuadros y gráficos

## **CAPITULO I : INTRODUCCION**

### **1.1.- OBJETIVO**

El presente documento tiene como objetivos fundamentales:

En primer lugar el desarrollo y evaluación de un prototipo de compresor de viga balancín de fabricación nacional, con el fin de determinar la factibilidad técnica y económica de su implementación en el proceso de extracción con bombeo mecánico en campos de Noroeste.

El segundo objetivo es el de incrementar la productividad de los pozos reduciendo la contrapresión de los forros de los pozos mediante el uso de un compresor de gas accionado por el mismo movimiento de la viga balancín de la unidad de bombeo mecánico.

### **1.2.- SUMARIO**

El presente estudio parte de la visualización de una oportunidad de mejora de la productividad de los pozos de bombeo mecánico que vienen produciendo hidrocarburos con alta presión dinámica como consecuencia de una alta presión en los forros.

El sistema extractivo comprende de: Equipo de extracción artificial, redes de recolección y de los tanques de almacenamiento. Las condiciones de operación de los tres subsistemas se encuentran estrechamente relacionadas, tanto que todas ellas impactan en la presión de boca de pozo. Estos son: una alta presión de operación en los centros de recolección (baterías), grandes longitudes de líneas de producción pozo – batería y la geografía del terreno.

Una alta presión en la línea de producción a la altura de la boca de pozo se traduce generalmente en una alta presión en los forros en los pozos donde el anular y los tubos están interconectados (pozos sin empaque). Las altas contrapresiones en forros originan altas presiones dinámicas en el fondo del pozo que terminan afectando significativamente la productividad de los

reservorios comprometidos con la producción, en mayor medida en los pozos de mayor índice de productividad (PI).

Asimismo, en campos maduros como es el caso todos los yacimientos de la cuenca Talara con un poco mas de media centuria de explotación, en la que las gradientes de presión de los reservorios son bajas, con valores que oscilan en la actualidad entre 0.2 a 0.30 psi/ft y la particularidad de su completación, de producir de varios reservorios a la vez y que fueron completados en diferentes tiempos, presentan un escenario de oportunidad de incremento de producción para la aplicación del compresor de gas de viga balancín (CGB), principalmente en aquellos pozos de alta presión dinámica como consecuencia de una alta presión en los forros.

En el Noroeste hay aproximadamente 2280 pozos que producen por bombeo mecánico que representan el 92% de la totalidad de pozos en producción con algún tipo de sistema de producción artificial, de los cuales, un 42% producen hidrocarburos con 40% a menos de corte de agua y con presión en forros mayores a 20 psi, condiciones potenciales para mejorar su productividad con el empleo del compresor de viga balancín. Por la cantidad de pozos potenciales, aproximadamente 700, su desarrollo local tendrá gran implicancia en el incremento de la producción, la generación de empleo y en el conocimiento de dicha tecnología.

Para tal fin, se implementó un proyecto piloto que involucró desarrollo (diseño y construcción), puesta en operación y evaluación de 12 compresores de viga balancín de diferente capacidad de desplazamiento instalados en igual número de pozos de bombeo mecánico previamente seleccionados de tres yacimientos diferentes (Taimán, Zapotal y Organos) para medir el nivel de respuesta en cada una de ellas durante un año.

El dispositivo CGB se compone de un pistón y cilindro cuya función es succionar el gas del anular del pozo, comprimirlo y descargarlo a la línea de producción. Dicho compresor trabaja montado en la unidad de bombeo mecánico, su pistón es accionado por el propio movimiento de la viga balancín

de la unidad, generando un efecto de succión cuando la cámara está en expansión y luego comprime y descarga en la etapa de compresión.

Para el desarrollo del compresor se definieron parámetros de diseño (máxima presión de diseño en función de la presión de operación), se especificaron la calidad de los materiales de los componentes, se revisó información de la geometría de las unidades de bombeo en el campo y se realizaron cálculos de diseño mecánico para determinar el diámetro del vástago, luz entre pistón y cilindro, etc. Además, se calculó el consumo de energía adicional requerido para cada aplicación con la finalidad de redimensionar la capacidad del motor y garantizar la operatividad de la unidad de bombeo mecánico por debajo de su torque nominal.

### **1.3. ANTECEDENTES**

Según el artículo del Centro de Pruebas del Campo de Petróleo de las Montañas Rocosas (Rocky Mountain Oilfield Testing Center, RMOTC) publicado en Julio de 1997, el dispositivo CGB fue probado en el pozo 62AX3 de 3000 pies de profundidad de un reservorio de arena y arenisca (sandstone) de 40 pies de espesor, con una porosidad promedio de 19% y permeabilidad de 100 a 150 md. Antes de la instalación del CGB la presión en el anular era de 25 a 30 psi y la producción de petróleo de 6.3 bopd y 104 Mscf/d de gas. Después de la instalación del dispositivo la presión en el anular bajó a 5 psi y la producción de petróleo y gas incrementó a 9.1 bopd y 142 Mscf/d respectivamente, habiéndose obtenido un incremento de producción de petróleo de un 44% y 37% en la producción de gas mediante una reducción de la presión en el anular del pozo de un 82%.

En Marzo de 1998 La misma RMOTC publicó un segundo artículo sobre la aplicación del dispositivo CGB en los pozos 88AX28 y 11AX34 de alto corte de agua 90% y 98%, en el primer pozo la producción antes de la instalación del CGB era de 1.7 bopd x 15 bapd x 30 Mscf/d y la presión en el anular de 70 psi, después de la instalación del BGC la producción del pozo fue 2 bopd x 15 bwpd x 37 Mscf/d, registrándose un incremento en la producción de petróleo y gas de

17% y 23% respectivamente, mientras que la presión en el anular se redujo a 34 psi (71%). Respecto al pozo 11AX34 de producción 2 bopd x 110 bwpd x NR, en el artículo se manifiesta que con la instalación del CGB se obtuvo un incremento en la producción similar al del pozo 88AX28.

En el País una compañía nacional probó el dispositivo CGB en dos pozos ( X1 y X2 del área Batanes en los meses de Noviembre a Diciembre del 2005 siendo las características de los pozos, profundidad media 2000 pies, formación Pariñas (arena y arenisca), espesor de arena neta 80 a 120 pies, porosidad 12 – 14 %, permeabilidad 6 a 10 md y crudo de 32° API. Después de la instalación del dispositivo, los dos pozos manifestaron incrementos importantes de petróleo 80% para el pozo X1 y 50% para el pozo X2, para una reducción de la presión en sus forros de 7 y 6 psi respectivamente.

## **CAPITULO II: FUNDAMENTO TEORICO**

### **2.1. DESCRIPCION GENERAL DEL SISTEMA DE PRODUCCION**

Los hidrocarburos de los reservorios son transportados a través de un sistema complejo hasta alcanzar su destino en la superficie. Este sistema llamado sistema de producción tiene como componentes principales al: reservorio, pozo, línea de superficie y separador.

Este es un sistema de elementos interconectados e interactivos que tienen un desempeño específico, pero que cada uno depende e influencia sobre los otros elementos. Para producir fluidos de un pozo, todos los componentes del sistema trabajan juntos, la solución de cualquier problema de producción de fluidos requiere que el sistema de producción sea tratado como un todo.

Los fluidos drenados de los reservorios hacia el pozo son levantados a la superficie por medio de algún sistema de producción artificial (Bombeo mecánico, Plunger Lift, Gas Lift, BCP, etc), esto es, cuando la energía natural del reservorio es insuficiente para hacerlos llegar hasta superficie.

Los fluidos en superficie son recolectados a través de líneas de producción y múltiples de distribución hacia la fuente de recepción llamado comúnmente Batería. En la figura A-1 del anexo se ilustra el proceso de producción típico de Noroeste.

### **2.2. SISTEMA DE PRODUCCION ARTIFICIAL BOMBEO MECANICO**

Es el sistema de levantamiento artificial más antiguo y más empleado en pozos de petróleo del mundo y también del Perú. En Noroeste, aproximadamente el 92% de los pozos que producen con sistemas de levantamiento artificial lo hacen empleando Bombeo Mecánico.



La función del sistema es transmitir la potencia motriz a la bomba de subsuelo para levantar los fluidos del fondo del pozo hasta la superficie. La bomba, se encarga de evacuar los fluidos que aportan los reservorios con la finalidad de mantener una baja presión de fondo. Un diferencial de presión grande entre la formación y el fondo del pozo incrementa la tasa de producción.

El sistema se constituye de una instalación de superficie y de subsuelo (ver anexo Fig. A-02). El equipamiento de superficie involucra la unidad motriz (motor eléctrico o motor a gas), unidad de bombeo, barra pulida, prensa estopa, cabezal, y líneas de flujo. El equipo de subsuelo incluye el revestimiento de producción, tubería de producción, sarta de varillas, bomba de subsuelo, ancla de gas (opcional), niple de asiento, tubo perforado y tubo de cola.

En la superficie se instala el motor que es la unidad generadora del movimiento cuya energía puede ser gas natural en caso de motor a gas o energía eléctrica en caso de motor eléctrico, el movimiento rotacional es transmitida a la caja reductora de la unidad de bombeo (PU) a través de las fajas de transmisión a altas revoluciones, en la caja reductora la velocidad rotacional se reduce por medio de un conjunto de piñones. Esta velocidad rotacional luego es convertida a movimiento vertical a través de las bielas de la unidad de bombeo. De este modo, el movimiento vertical es aprovechado para mover los elementos del subsuelo, que a través de la sarta de varillas mueve el pistón de la bomba en caso de bombas de barril fijo o el barril en caso de bombas de barril viajero.

Un caso típico de sistema de bombeo mecánico es ilustrado en la figura N° A-03 del anexo. Los únicos aspectos de un pozo tradicional de bombeo mecánico son: la ausencia de un empaque en el pozo y la conexión en la cabeza del pozo entre el anular y la línea de flujo a través de una válvula de retención. El espacio anular permanece comunicado tanto en el fondo como en la cabeza del pozo, dos vías están disponibles para el movimiento de fluidos hacia superficie, uno es a través de la sarta de producción donde los fluidos son levantados hacia la superficie por la bomba de subsuelo, y la otra vía es el anular donde los líquidos alcanzan un nivel estacionario, encima del cual existe

una columna de gas. Ya que las dos vías de flujo están conectados entre sí en el fondo, se deduce de la ley de la hidrostática de vasos comunicantes que la presión ejercida en el fondo (nodo 2 de la Fig. A-03 del anexo) es la misma. Por tanto, existen dos vías para calcular la presión de fondo en pozos de bombeo mecánico.

### **2.3. INCREMENTO DE LA PRODUCTIVIDAD DE LOS POZOS APLICANDO VACIO EN EL ANULAR**

Como se sabe, el flujo de hidrocarburos de la roca reservorio hacia el pozo se origina por la diferencia de presión existente entre la presión del reservorio y la presión en el interior del pozo. Reduciendo la presión que normalmente existe dentro del pozo, se aumenta el diferencial de presión entre el reservorio y el pozo, en consecuencia de ello, se logra estimular la recuperación de hidrocarburos de los pozos.

El incremento de presión diferencial entre la roca reservorio y el pozo, que se logra al aplicar el vacío, permite la evacuación de gases y vapores de los espacios drenados de aceite de la roca reservorio al pozo, esta acción favorece la liberación de grandes volúmenes de gas y vapor inicialmente disueltas en el petróleo residual, dando como resultado un incremento en la recuperación de hidrocarburos condensables en forma de vapor.

Las superficies de los poros parcialmente drenados de la arena reservorio quedan mojados con aceite después del drenaje natural, y grandes volúmenes quedan retenidas dentro de las minúsculas aberturas capilares y los ángulos entrantes entre los granos. Estas películas extendidas así sobre extensas áreas, quedan saturadas con gas disuelto y con hidrocarburos de bajo punto de ebullición, que pueden pasar a la fase de vapor con una ligera reducción de presión. La evacuación del gas y los vapores de los espacios drenados de aceite, junto con la reducción de presión, origina que una gran parte de los hidrocarburos de alta presión de vapor componentes del aceite escapen de estas películas superficiales. Los grandes volúmenes de gas y de vapores, así liberados, barren gran cantidad de aceite de los espacios porosos de la roca

hacia los pozos a través de los canales de drenaje, incrementando así, la recuperación de petróleo y gas. En el proceso de vacío, el aumento de la presión diferencial es ligero, pero el aumento de volumen de gas puede ser grande y la energía disponible para transportar el petróleo aumenta proporcionalmente.

La capacidad del vacío para producir aceite adicional depende en gran parte de la textura de la roca reservorio. Si es de grano grueso, si la permeabilidad es alta y si las capas son bastante continuas, el vacío muy probablemente tendrá éxito para incrementar la recuperación de petróleo. Por otra parte, si la arena es de grano fino y la permeabilidad es baja el vacío podría tener poco efecto. Las propiedades del petróleo también tienen influencia en la efectividad del vacío, respondiendo positivamente los petróleos más ligeros y móviles y menos favorable los petróleos más densos y viscosos.

La figura A-04 del anexo presenta curvas que ilustran los efectos benéficos del vacío que incrementaron la recuperación de petróleo del reservorio Glenn de Oklahoma, en ella la recuperación total aumentó en un 9% por encima de lo que hubiera sido posible sin el vacío, en un periodo de 12 años.

Parece probable que el efecto del vacío está en gran parte limitado a los espacios drenados de aceite de los que se ha obtenido la producción de este. En las áreas de arenas compactas que quedan relativamente sin drenar, las superficies de la arena no están expuestas a la evaporación y en consecuencia, los gases y vapores disueltos no se vaporizan como en las áreas más abiertas. Sin embargo, el mantener la presión reducida gradualmente pone las áreas de arenas compactas bajo su influencia, drenándolas con lentitud hacia las arenas más porosas que las rodean. Los efectos de drenaje prolongado, que duran algunas veces periodos de muchos años, se pueden explicar con la teoría de que las arenas más compactas solo se invaden lentamente en esta forma por la extensión de las condiciones de vacío de las áreas circunvecinas de grano más grueso y más permeable.

El límite de la utilidad del proceso de vacío se alcanza cuando todo el gas y los vapores obtenibles con el vacío máximo que se puede ejercer se han sacado. Ya que esto se puede lograr efectivamente en unos cuantos meses en un área pequeña, la continuación del proceso depende de cuerpos de arenas nuevos y relativamente sin drenar que constantemente quedan sujetos a la influencia de la presión reducida.

#### **2.4. ASPECTOS PRACTICOS DEL BOMBEO MECANICO CON PRESION DE VACIO EN EL ANULAR**

Al aplicar vacío a los pozos de bombeo mecánico, estos deben estar equipados con bombas de émbolo de estilo común, tubería de producción, varillas y cabezal todos dentro de un sistema hermético. Una de las salidas de los forros de cada pozo deberá estar conectada a un sistema de recolección de gas de baja que conduzca a una bomba de vacío de capacidad adecuada o hacia la succión de un compresor de gas.

Se deben tomar todas las precauciones necesarias para evitar la entrada de aire al sistema de vacío, especialmente, alrededor del cabezal del pozo en donde es más probable que ocurra. Debe hacerse un esfuerzo para reducir la fricción en las líneas principales al valor más bajo posible, pues la resistencia de la tubería reduce la efectividad del vacío desarrollado dentro del reservorio. Aún con los mejores diseños posibles y el mejor equipo de bombeo, existe una pérdida inevitable por fricción, ineficiencia de las válvulas y pequeñas entradas en el equipo de superficie. Existe también otra pérdida debido al efecto de fricción generada por el flujo de gas del fondo del pozo hacia superficie por el anular.

En situaciones en que la planta central de vacío está situada a distancias considerables de los pozos, se instalan bombas elevadoras o impulsadoras a distancias medias para ayudar a la planta central a mantener un vacío aproximadamente uniforme en todo el sistema.

Una alternativa eficaz para producir pozos de Bombeo Mecánico con presiones en el anular cercanas a la presión de vacío son la instalación de pequeños compresores de viga balancín en cada pozo que operan accionados por la misma fuerza motriz del sistema de extracción, objeto del presente estudio.

## **2.5. ASPECTOS DE OPERACIÓN DEL COMPRESOR DE VIGA BALANCÍN (CGB)**

El dispositivo de compresión básicamente está compuesto de un cilindro y pistón y de un juego de válvulas de retención usados para dirigir el flujo de gas hacia dentro y fuera del compresor.

Los CGB están diseñados para trabajar con el movimiento de la viga balancín de las unidades de Bombeo Mecánico por tanto utilizan la potencia del motor del sistema. Su instalación es sencilla y no requieren de trabajos de soldadura para su fijación en la unidad de bombeo, para ello se utilizan abrazaderas, pernos y templadores.

Estos pueden ser de acción simple (CGSB) o de acción doble (CGBD). La de acción simple succiona gas durante la carrera hacia arriba y lo descarga a la línea de producción durante la carrera hacia abajo. Mientras que la de acción doble succiona, comprime y descarga en ambas carreras.

Las Figuras A-5, A-6 y A-7 del anexo muestran un plano seccional del CGBD, el diagrama de flujo e instalación del BCG. El CGB puede instalarse en el espacio que hay entre el poste trasero y la base de la caja reductora o delante del poste maestro cuando no se puede instalar en la posición anterior.

### **2.5.1. Análisis FODA del Sistema CGB**

#### **Fortalezas del sistema**

- Equipo portátil de fácil instalación
- De bajo costo de fabricación y de instalación (Inversión).

- Eficaz para reducir la contrapresión en el anular del pozo, puede reducir la presión a menos de 0 psi manométrico (vacío).
- Bajo costo de mantenimiento, equipo con pocos elementos críticos.
- No requiere de fuente de energía adicional, ya que utiliza la energía del motor del AIB.
- No requiere de mano de obra adicional, ya que puede ser supervisado por el multitarea como parte de su visita al pozo.
- Repuestos y materiales fáciles de conseguir en el mercado local y nacional y de bajo costo.

### **Debilidades**

- Volumen de compresión limitado
- Baja presión de operación, máximo 200 psi.
- Depende de las condiciones operativas del AIB y del propio sistema, no aplicable a otro sistema de producción

### **Oportunidades**

- Aplicación en pozos de AIB que ventean gas.
- Aplicación en pozos de AIB que trabajan con alta contrapresión anular
- Posibilidad de uso multiplicador, empleo de un solo equipo para dos o tres pozos cercanos.
- Desactivación de centros de recolección de alto costo de remodelación sin pérdida de producción de los pozos.
- Generación de empleo local por su fácil reproducción.

### **Amenazas**

- Ninguna.

## 2.6. FLUJO EN TUBERIAS Y RESTRICCIONES

Para determinar el comportamiento de cualquier pozo productor es necesario calcular las pérdidas de presión en todos los componentes del sistema descrito en la Figura A-03 del anexo.

Dado que, los pozos con instalación artificial bombeo mecánico los forros están comunicados directamente a la salida de la tubería de producción en la cabeza del pozo y en la entrada de la bomba de subsuelo, entonces, existen dos vías para determinar la presión de fondo fluyente. La primera a través del anular del pozo y la segunda a través de la tubería de producción.

A través del anular

$$P_{wf} = P_{sep} + \Delta P_{fl} + \Delta P_{cg} + \Delta P_{cl} \quad (1)$$

A través de la tubería de producción

$$P_{wf} = P_{sep} + \Delta P_{fl} + \Delta P_{vr} + \Delta P_{tbg} + \Delta P_{bs} \quad (2)$$

Donde:

- $P_{wf}$  : Presión de fondo fluyente
- $P_{sep}$  : Presión del separador
- $\Delta P_{fl}$  : caída de presión en la línea de flujo
- $\Delta P_{cg}$  : Diferencial de presión por columna de gas en el anular
- $\Delta P_{cl}$  : Diferencial de presión por columna de líquido en el anular
- $\Delta P_{vr}$  : caída de presión en la válvula reguladora
- $\Delta P_{tbg}$  : caída de presión en la tubería de producción
- $\Delta P_{bs}$  : caída de presión en la bomba de subsuelo

Por ser de interés la ecuación 1 para el presente estudio, explicaremos a continuación las expresiones matemáticas que permiten determinar cada uno de los componentes para luego calcular la presión de fondo fluyente de un pozo de bombeo mecánico.

### 2.6.1. Presión del separador

Generalmente es igual a la presión de operación de la batería, esta presión suministrada por una fuente de gas es regulada a valores de 10 a 25 psi y es necesaria para el proceso de separación, medición de líquidos, medición de gas y secado del gas.

### 2.6.2. Pérdida de presión en la línea de flujo

Todos los pozos de Noroeste por lo general producen petróleo, agua y gas. Siendo variable la proporción Gas Aceite y Agua Aceite de pozo a pozo, por ello, las ecuaciones que gobiernan el flujo en las líneas de producción son del tipo multifásico o de dos fases.

La ecuación general de gradiente de presión aplicable a cualquier flujo de fluidos en tubería inclinada a un ángulo  $\theta$  de la horizontal es:

$$\frac{\partial p}{\partial L} = \left(\frac{\partial p}{\partial L}\right)_{el} + \left(\frac{\partial p}{\partial L}\right)_f + \left(\frac{\partial p}{\partial L}\right)_{acc} \quad (3)$$

#### Componente cambio de elevación

Es el componente debido a la energía potencial o cambio de elevación, está referido también a la columna hidrostática.

Para flujo de dos fases, líquido – gas, la expresión que calcula el diferencial de presión por cambio de elevación es:



$$\left(\frac{\partial p}{\partial L}\right)_{el} = \frac{g}{g_e} \rho_s \text{sen } \theta \quad (4)$$

Para un diferencial de línea de flujo,  $\rho_s$  es la densidad de la mezcla gas/líquido y es calculado a partir de la siguiente ecuación cuando hay escurrimiento en el flujo:

$$\rho_s = \rho_L H_L + \rho_g H_g \quad (5)$$

$$H_L = \frac{\text{Volumen - de - liquido - en - un - elemento - diferencial}}{\text{volumen - del - elemento - diferencial}} \quad (6)$$

$$H_g = 1 - H_L \quad (7)$$

Donde:

$H_L$  : es la fracción de un elemento diferencial de línea de flujo ocupado por el líquido en un instante. Este valor varía de cero para flujo de 100% de gas y 1 para flujo de 100% líquido.

El valor de  $H_L$  no puede ser calculado analíticamente, sino a partir de correlaciones empíricas; es función de las propiedades del gas y del líquido, del patrón de flujo y del diámetro e inclinación de la línea de flujo.

En flujos sin escurrimientos de líquido donde el gas y el líquido viajan a la misma velocidad, la densidad de la mezcla se calcula a partir de la siguiente expresión.

$$\rho_s = \rho_L \lambda_L + \rho_g \lambda_g \quad (8)$$

Donde:

$\lambda_L$  Se define como la razón del volumen líquido en un elemento diferencial que pudiera existir si el gas y líquido viajan a la misma velocidad entre el volumen del elemento diferencial. Es calculado a partir de los caudales conocidos del gas y del líquido.

$$\lambda_L = \frac{q_L}{q_L + q_g} \quad (9)$$

$$\lambda_g = 1 - \lambda_L \quad (10)$$

Donde  $q_L$ , es la suma del caudal del petróleo y del agua y  $q_g$  es el caudal del gas.

### Componente Pérdida de Carga por Fricción

Este segundo componente de la ecuación general de gradiente de presión es función del factor de fricción, de la densidad de los fluidos, de la velocidad de las fases y del diámetro de la línea de flujo.

$$\left(\frac{\partial p}{\partial L}\right)_f = \frac{(f\rho_s v_m^2)_f}{2g_e d} \quad (11)$$

Donde:

$\rho_s$  es calculado de las ecuaciones 5 ú 8 dependiendo si se considera escurrimiento o no durante el flujo.

La velocidad de la mezcla ( $v_m$ ) o velocidad de las dos fases es calculado sobre la base del caudal total in-situ.

$$v_m = \frac{q_L + q_g}{A} \quad (12)$$

$f$ , es determinado a partir del número de Reynolds, de la rugosidad y material de la tubería de conducción.

$$N_{RE} = \frac{\rho v d}{\nu} \quad (13)$$

Para flujo laminar:  $N_{RE} < 2000$ , el factor de fricción es calculado a partir de la siguiente expresión:

$$f = \frac{64}{N_{RE}} \quad (14)$$

Para flujo turbulento:  $N_{RE} > 2100$ , la ecuación de Colebrook y White será aplicada para encontrar el factor de fricción en todos los casos.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.74 - 2 \text{Log} \left( \frac{2\varepsilon}{d} + \frac{18.7}{N_{RE} \sqrt{f}} \right) \quad (15)$$

### Componente aceleración

Para flujo de dos fases esta representado por la siguiente expresión:

$$\left( \frac{\partial p}{\partial L} \right)_{acc} = \frac{(\rho_s v_m \partial v_m)_k}{g_e \partial L} \quad (16)$$

Considerando que no se producen cambios de velocidad a lo largo de la línea de flujo (diámetro uniforme), entonces, no hay variación en la energía cinética, por tanto este componente es nulo.

Finalmente, la ecuación general de gradiente de presión de flujo de fluidos queda simplificada a la siguiente expresión.

$$\frac{\partial p}{\partial L} = \left(\frac{\partial p}{\partial L}\right)_{el} + \left(\frac{\partial p}{\partial L}\right)_f \quad (17)$$

### 2.6.3. Diferencial de presión por columna de gas

Debido que el anular de los pozos con bombeo mecánico no está sellado en el fondo del pozo (sin empaque), permite que los fluidos del pozo ingresen hacia el espacio anular que actúa como un separador natural de gas/líquido. La separación de los fluidos del pozo forma una columna de líquido y gas en el anular.

Como los forros están directamente conectados a la línea de flujo en la superficie, la presión de la columna de gas en el tope del anular es igual a la presión de la tubería de producción. Esta presión que ejerce la columna de gas depende del gradiente de la densidad en la columna del gas, la composición del gas, el gradiente geotérmico de la temperatura y la longitud de la columna, como veremos a continuación.

Deducción a partir de la ecuación de la elevación:

$$\frac{\partial p}{\partial L} = \frac{g}{g_e} \rho_g \text{sen} \theta \quad (18)$$

Para una línea inclinada  $\partial L \text{sen} \theta = \partial h$ . Para un pozo vertical, la inclinación  $\theta = 90^\circ$ ,  $\text{sen} \theta = 1$ , introduciendo estos cambios y usando la unidad de presión en psi la ecuación 18 queda reducida a:

$$\frac{\partial p}{\partial h} = \frac{1}{144} \rho_g \quad (19)$$

Introduciendo,  $\rho_g = \frac{\rho_{gsc}}{\beta_g} = \frac{0.0764\gamma_g}{0.0283 \frac{ZT}{p}}$  en la expresión 19, se obtiene la

siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{\partial p}{\partial h} = 0.01877 \frac{p\gamma_g}{ZT} \quad (20)$$

Para la solución de la ecuación diferencial se asume que Z y T son constantes para un pequeño incremento de profundidad vertical  $\Delta h$ , la presión entre dos puntos del anular es:

$$p_2 = p_1 \exp\left(0.01877 \frac{\gamma_g \Delta h}{Z_{avg} T_{avg}}\right) \quad (21)$$

Donde:

$P_1$ : presión de la columna de gas a la profundidad h, psi

$P_2$ : presión de la columna de gas a la profundidad  $h + \Delta h$ , psi

$Z_{avg}$ : factor de compresibilidad del gas promedio entre los puntos 1 y 2

$T_{avg}$ : temperatura absoluta promedio entre los puntos 1 y 2, °R.

$\Delta h$ : Distancia vertical entre los puntos 1 y 2.

Considerando que los gases de la mayoría de los campos de Noroeste con pozos de aceite tienen aproximadamente la misma composición, 80% o más de  $CH_4$  y la temperatura no varía sustancialmente. Podemos utilizar la siguiente ecuación empírica de Gilbert para determinar la presión que ejerce la columna de gas.

$$\Delta p_{cg} = p_f \frac{D^{1.5}}{100} \quad (22)$$

Donde:

D : Profundidad en miles de pies

$P_f$ : Presión de forros, en psia

$\Delta p_{cg}$ : Presión ejercida por la columna de gas en el anular

#### 2.6.4. Diferencial de presión por columna de líquido en el anular

La presión ejercida por una columna de líquido-gaseoso en el anular de un pozo de bombeo mecánico es determinada a partir de la siguiente ecuación.

$$\Delta p_{cl} = \Delta h_L \text{grad}_L H_L \quad (23)$$

Donde:

$\Delta p_{cl}$  : Presión hidrostática de la columna líquida gaseosa en el anular, psi

$\Delta h_L$  : Altura encima de la formación de la columna líquida gaseosa en el anular, pies

$\text{grad}_L$  : Presión hidrostática de la columna líquida gaseosa en el anular, psi

$H_L$  : Factor de corrección de la gradiente

$\Delta h_L$ , es encontrado a partir de la medida del nivel de líquido en el anular del pozo, el cual es determinado de registros sónicos (Echometer).

Para el cálculo de  $H_L$ , existen varias correlaciones, tales como, la curva S de Gilbert, Godbye and Dimon, McCoy, etc. Esta última es la utilizada por la compañía "Echometer".

Para el presente trabajo, utilizaremos la curva S de Gilbert (Fig. A-08 del anexo) para determinar el factor de corrección de la gradiente de la columna líquida  $H_L$ . Gilbert propuso un gráfico  $H_L$  vs el siguiente grupo de parámetros:

$$Q/A/p_w^{0.4}$$

Donde:

- Q: Caudal de gas en el anular, Mscf/d  
 A: área de la sección anular, pulg<sup>2</sup>  
 Pw: presión de la columna en el anular, psi

Dado que los forros están directamente conectado a la línea de flujo en la superficie, la presión de la columna de gas en el tope del anular iguala a la presión de la tubería de producción, entonces, la presión de forros ( $p_f$ ) es:

$$P_f = P_{sep} + \Delta P_{fl} \quad (24)$$

Sustituyendo en la ecuación 01 la presión de fondo fluyente resulta:

$$P_{wf} = P_f + P_{cg} + P_{mcl} \quad (25)$$

Donde:

$P_{cg}$  : Presión ejercida por la columna de gas en el anular

$P_{mcl}$  : Presión de la semi columna líquida en el anular

El método consiste en:

- Calcular una primera aproximación de la presión de fondo fluyente ( $P_{wf}$ ) a partir de la ecuación 25, determinando previamente la presión de forros, presión ejercida por la columna de gas (ecuación 22) y la presión ejercida por la columna líquida gaseosa de la ecuación 23 (considerando la mitad de la columna líquida y  $H_L=1$ ),
- Determinado la presión de fondo fluyente ( $P_{wf}$ ) se calcula la relación  $Q/A/P_{wf}^{0.4}$ , para la producción de gas diaria del pozo y para la sección anular de la misma. Con este valor se determina  $H_L$  a partir de la curva de Gilbert (Fig. A-08 del anexo).
- En la segunda iteración, el valor de la presión de fondo fluyente ( $P_{wf}$ ) es ajustado considerando el efecto del gas en la gradiente del líquido, el

cual es  $grad_L H_L$ . Con el nuevo valor de la presión de fondo fluyente (Pwf) se vuelve a calcular la expresión  $Q/A/P_{wf}^{0.4}$ . Nuevamente de la curva de Gilbert volvemos a encontrar  $H_L$ .

- El proceso termina cuando los dos últimos valores de  $H_L$  son muy aproximados
- Finalmente a partir de la ecuación 23 se determina la presión de la columna líquida corregida por la presencia de gas en el líquido.



## CAPITULO III FUNDAMENTOS DE DISEÑO DEL CGBD

### 3.1. Determinación del Tamaño del Compresor

El tamaño del compresor se especifica en función del desplazamiento y del diámetro del pistón del compresor. A continuación se describen las ecuaciones para la determinación de la longitud del cilindro del compresor.

#### 3.1.1. Longitud de desplazamiento del compresor

La longitud del desplazamiento del pistón del compresor depende de la posición de anclaje del compresor en la viga balancín, de la carrera y de la geometría de la unidad de bombeo. En la siguiente figura se muestra la posición del compresor en una unidad de bombeo convencional.

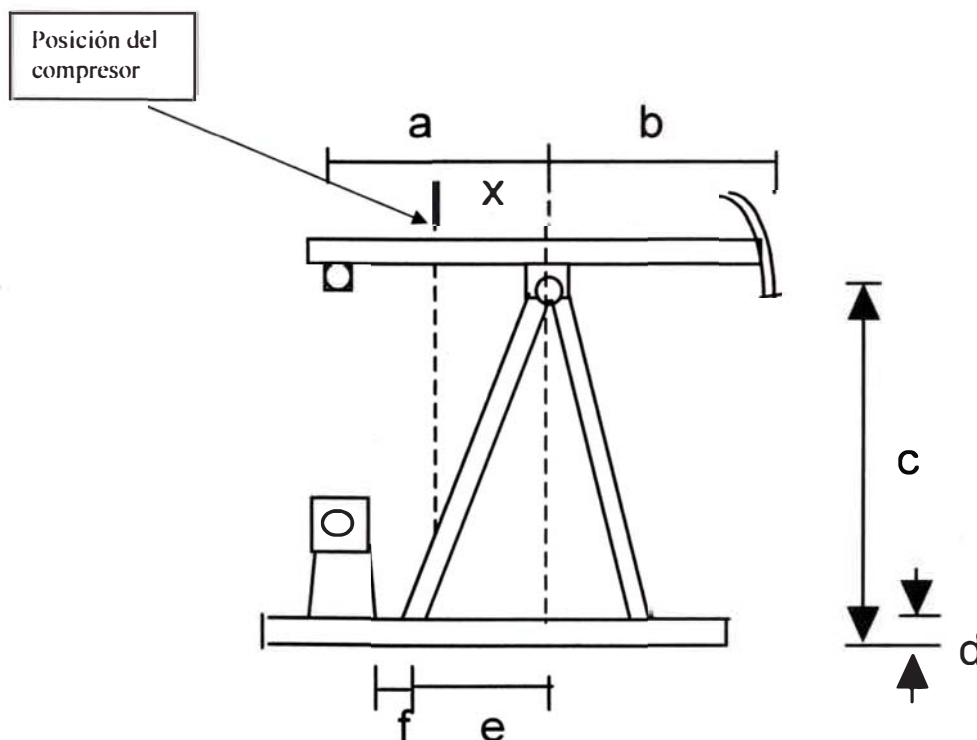


Figura N° 01

En la figura N°02, se ilustra el desplazamiento vertical de la viga balancín de la unidad de bombeo y la del compresor posicionado a una distancia X del eje del poste maestro, a y b son las longitudes del eje central a la cabeza de la unidad y del eje central hacia el otro extremo del balancín respectivamente, s la carrera de la unidad y  $L_d$  la longitud de desplazamiento del pistón, que es la que determinaremos a continuación.

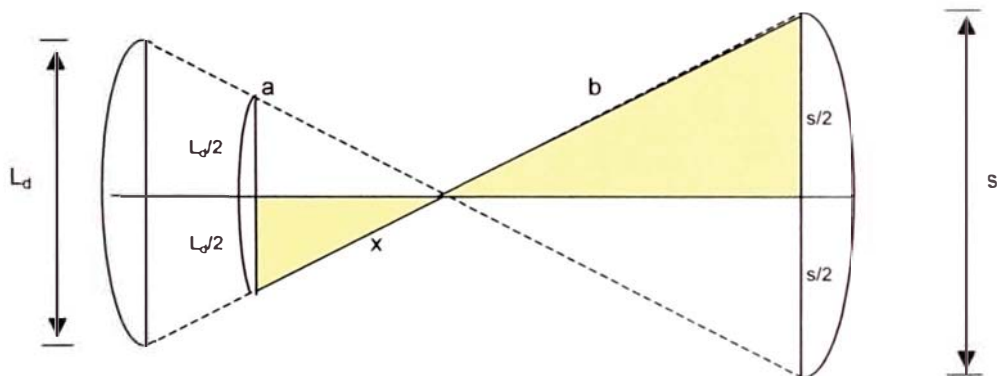


Figura N° 02

Estableciendo semejanza de triángulos entre los dos triángulos achurados se establece la siguiente relación:

$$L_d/2/x = s/2/b$$

$$L_d = \frac{sx}{b} \quad (26)$$

### 3.1.1.1. Determinación de la longitud del cilindro del compresor

Es función de la longitud del desplazamiento del pistón, del grosor del pistón y de la altura de los espacios muertos.

### Esquema de desplazamiento del compresor

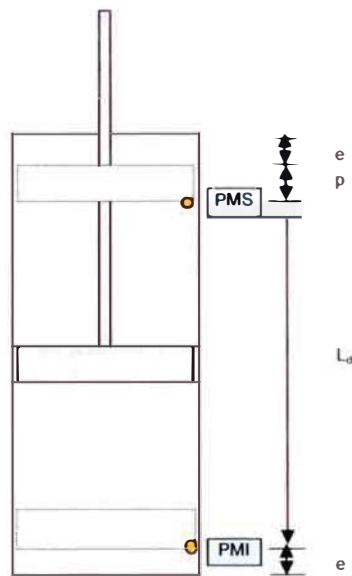


Figura N° 03

$$L_t = L_d + p + 2e \quad (27)$$

Donde:

- $L_t$  : Longitud del barril
- $L_d$  : Desplazamiento del pistón
- $p$  : grosor del pistón
- $e$  : espacio muerto

Para el diseño de los compresores de viga balancín se consideró un grosor de pistón constante.

#### 3.1.1.2. Cálculo de la altura del espacio muerto

Se determina a partir de un análisis físico del comportamiento de los gases ideales, dado que las presiones y temperaturas de operación son bajas.

Considerando una condición isotérmica del sistema y aplicando la ley de Boyle para estas dos situaciones como si fuera un sistema cerrado se tiene:

$$(P_d + 14.7)xAxe = (P_s + 14.7)xAx(L_d + e) \quad (28)$$

Donde:

$P_d$  : presión de descarga en el máximo desplazamiento del pistón punto PMI de la figura N° 03.

$P_s$  : presión de succión en el punto PMS del esquema.

e: altura del espacio muerto del cilindro que debe considerarse en el cálculo de la longitud del cilindro para regular una presión de trabajo determinada.

Despejando e de la ecuación anterior se tiene:

$$e = \frac{(P_s + 14.7)xL_d}{(P_d - P_s)} \quad (29)$$

*Para las siguientes condiciones de trabajo:*

$P_s = 0$  psi en la máxima succión

$P_d = 300$  psi

La ecuación (29) queda simplificada a:

$$e = \frac{14.7xL_d}{300} \quad (30)$$

### **3.1.2. Determinación del diámetro del compresor**

Determinado la longitud de desplazamiento del pistón a partir de la ecuación 26, el siguiente paso es determinar el diámetro del cilindro del compresor, para el cual, el dato de entrada es la producción de gas del pozo a 24 hrs de trabajo.

Para un pozo que produce  $Q_t$  scf de gas en  $t$  hrs, su producción en 24 hrs. Puede ser calculado por la siguiente ecuación.

$$Q_{24} = 24 * \frac{Q_t}{t} \quad (31)$$

### 3.1.2.1. Cálculo del diámetro de un compresor de acción simple

La capacidad de desplazamiento de un compresor es función de la sección del pistón ( $A$ ), de la longitud de desplazamiento del pistón ( $L_d$ ), de las emboladas por minuto del pistón y de la presión de succión ( $P_s$ ).

En general el desplazamiento de un compresor de desplazamiento positivo está dado por la siguiente relación:

$$Q_c = A * L_d * S * P_s, \text{ pulg}^3/\text{min} \quad (32)$$

La de un compresor de **acción simple** en Mscf/d al 100% de eficiencia es:

$$Q_{cs} = \frac{S * L_d * A * P_s}{1500} \quad (33)$$

Para 0 psi,  $Q_{cs}$  es:

$$Q_{cs} = \frac{S * L_d * D^2}{130} \quad (33a)$$

Por tanto, despejando la ecuación 33a y haciendo que  $Q_{cs} = Q_{24}$ , se obtiene la relación para calcular el diámetro del compresor:

$$D'_{os} = 11.4 * \sqrt{\frac{Q_{24}}{S * L_d}} \quad (34)$$

Donde:

$S$ : strokes/min. es la misma del E.B.M.

$L_d$ : Longitud de desplazamiento del pistón, pies.

$D_o$ : Diámetro del pistón, pulg<sup>2</sup>.

$P_s$ : Presión de la succión, psia

### 3.1.2.2. Cálculo del diámetro de un compresor de acción doble

Y el desplazamiento de un **compresor de doble acción** en Mscf/d al 100% de eficiencia es:

$$Q_{cd} = \frac{S * L_d * A * P_s}{750} \quad (35)$$

Para 0 psi,  $Q_{cd}$  es:

$$Q_{cd} = \frac{S * L_d * D^2}{65} \quad (35a)$$

Del mismo modo, despejando la ecuación 35a y haciendo que  $Q_{cs} = Q_{24}$  se obtienen la relación para calcular el diámetro de un compresor de acción doble:

$$D'_{od} = 8.06 * \sqrt{\frac{Q_{24}}{S * L_d}} \quad (36)$$

Algunas veces la elección del tipo de compresor de acción simple o doble dependerá del criterio del diseñador en función del costo y de las características de la unidad de bombeo mecánico.

La pérdida de desplazamiento debido al volumen que ocupa el vástago del pistón no está considerado en la ecuación 34, ya que esta varía del 10% a 2% dependiendo del diámetro del compresor y del diámetro del vástago.

### 3.2. Determinación de la potencia adicional

La potencia adicional requerida para la operación del compresor de viga balancín en los equipos de bombeo mecánico es función de las carreras por minuto del pistón del compresor que es lo mismo que el de la unidad de bombeo, de la longitud de la carrera del pistón del compresor y de la presión de succión y descarga.

Para fines prácticos se determinará la potencia adicional requerida para accionar el compresor con base a las siguientes premisas:

- Presión de succión cero
- Velocidad a mitad de carrera el doble de la velocidad media de cada carrera

Para el cálculo del HP utilizamos la siguiente expresión:

$$Pot = \frac{F x v_m}{746} \text{ hp} \quad (37)$$

Donde:

$F$  : Fuerza. Kgf

$v_m$  : velocidad a mitad de carrera, m/s

La expresión de la fuerza para un diferencial de presión entre la presión de descarga y la de succión, considerando una presión de succión equivalente a la presión atmosférica, es:

$$F = 0.357 x P_f x d^2 \quad (38)$$

Donde:

$P_f$  : Presión de descarga, psi

$d$  : Diámetro del compresor, pulg

Del mismo modo, la velocidad a la mitad de la carrera ( $v_m$ ) considerando que es el doble de la velocidad media de toda la carrera ( $\bar{v}_m$ ) se calcula con la expresión 39 y 40.

$$\bar{v}_m = 0.0008469 \times L_d \times S_p \quad (39)$$

$$v_m = 2 \times \bar{v}_m \quad (40)$$

Donde:

$L_d$  : Longitud de desplazamiento

$S_p$  : Carrera del pistón por minuto

### 3.3. Efecto de cargas (fuerzas) en los componentes del compresor

En esta parte se analizará el efecto de la fuerza ejercida sobre el pistón y cilindro del compresor, es decir, determinar el grado de deformación a que estaría expuesto el pistón y el cilindro en las condiciones de trabajo con el objeto de evitar fallas estructurales o alcanzar un estado inadecuado del material.

Para el respectivo análisis haremos uso de los conceptos de Resistencia de materiales en lo que se refiere a cuerpos isótropos sometidos a carga. La siguiente figura muestra la unidad de análisis que es el diagrama de fuerzas uniformemente distribuidas sobre la sección del pistón del compresor.

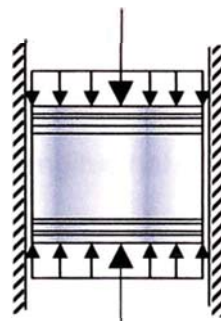


Figura 04



### 3.3.1. Deformación Longitudinal:

En la figura 04, el esfuerzo normal distribuido uniformemente en la superficie del pistón es la relación entre la fuerza ejercida por el gas sobre el pistón y la sección transversal de la misma:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (41)$$

La deformación unitaria longitudinal es la relación entre la variación de longitud (e) del pistón producto de la fuerza sometida y la altura del pistón en estado libre (p).

$$\varepsilon_l = \frac{e}{p} \quad (42)$$

Aplicando la ley de Hooke para la zona elástica, en la cual, establece que las deformaciones específicas y las tensiones son directamente proporcionales.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_l \quad (43)$$

Combinando las ecuaciones (41) y (42) en (43) se obtiene que la deformación longitudinal unitaria ( $\varepsilon_l$ ) es:

$$e = \frac{F \cdot p}{A \cdot E} \quad (44)$$

Donde:

E: es el módulo de elasticidad longitudinal o Módulo de Young

p: es la altura del pistón

A: Sección del pistón

F: Fuerza que ejerce la compresión de gas sobre el pistón

e: deformación longitudinal

La deformación longitudinal máxima para los materiales dúctiles no debe excederse del 2%, entonces:

$$\varepsilon = \frac{e}{p} = \frac{F}{A * E} < 0.2\% \quad (45)$$

como:  $A = \frac{\pi \cdot D_o^2}{4}$  reemplazando en la ecuación (45) y despejando  $D_o$  se obtiene:

$$D_o > 25.23 \cdot \sqrt{\frac{F}{E}} \quad (46)$$

Condición que asegura que se está trabajando en el rango elástico del material.

### 3.3.2. Deformación Transversal

Al someter un cuerpo a un esfuerzo axial, este experimenta deformación en la dirección de la fuerza aplicada y transversal a ella, es decir, en las direcciones normales a ella.

Denominando  $\varepsilon_l$  el estiramiento específico en dirección de la fuerza y  $\varepsilon_t$  la deformación específica transversal, se define como "Coeficiente de Poisson" o "Módulo de Poisson" a la relación entre:

$$\mu = -\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l} \quad (47)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\partial A}{A} \quad (48)$$

El valor de  $\mu$  es función del material y su variación es pequeña. En general para materiales isótropos  $\mu$  varía entre 0.25 y 0.33 y para cualquier caso  $\mu$  es menor de 0.50.

Combinando las ecuaciones (41), (43), (47) y (48) y despejando  $\partial A$  se tiene:

$$\partial A = -\mu \frac{F}{E} \quad (49)$$

Y el ensanchamiento del pistón producto de la carga se determina mediante la siguiente ecuación:

$$t = 1/2 * \left( \sqrt{\frac{4\partial A}{\pi} + D_o^2} - D_o \right) \quad (50)$$

Donde:

$\partial A$ : Es el diferencial de área

$D_o$ : Diámetro original del pistón

$t$ : Ensanchamiento del pistón

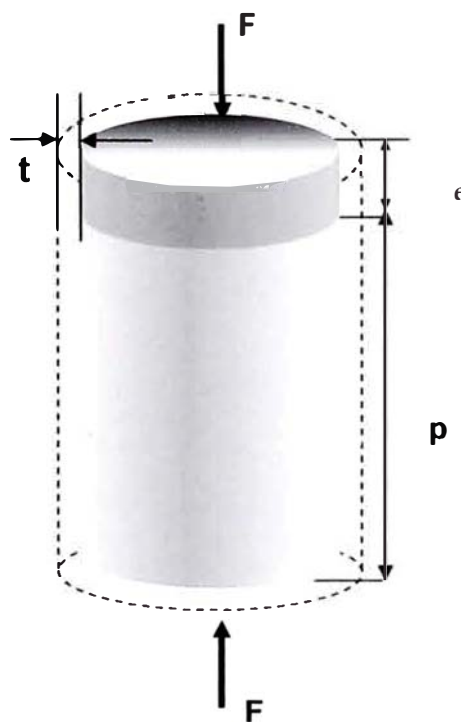


Figura 05

En el cuadro A-01 del anexo se presentan los módulos de elasticidad y de Poisson de algunos materiales incluido del acero.

### 3.4. Efecto de la temperatura en los componentes del compresor

El objeto es determinar el efecto que causa la temperatura en las dimensiones del pistón y cilindro del compresor.

En primera instancia calcularemos el incremento de temperatura del proceso del compresor para luego analizar la deformación de sus respectivos componentes.

#### *Cálculo de la Temperatura*

De la ecuación de los gases reales:

$$P * V = Z * n * R * T \quad (51)$$

Para las condiciones de trabajo, se determinará la temperatura alcanzada por el sistema.

#### **Condición 1:**

$P_1$  ,  $T_1$  y  $Z_1$  a condiciones normales: 14.7 psi, 60°F y 1 respectivamente y el volumen  $V_o$ .

#### **Condición 2:**

Presión máxima  $P_2$ ,  $V_2 = 1/20 * V_o$ ,  $Z_2$  y  $T_2$ .

Planteando la ecuación:

$$\frac{P_1 * V_1}{Z_1 * T_1} = \frac{P_2 * V_2}{Z_2 * T_2} \quad (52)$$

Reemplazando valores en la ecuación 52 se tiene:

$$T_2 = 1.77 * \frac{P_2}{Z_2} \quad (53)$$

A partir de la figura A-10 del anexo teniendo como dato la gravedad específica del gas, la presión máxima de diseño  $P_2$  y una temperatura  $T_2$  asumida mayor que 60°F se lee  $Z_2$ , luego, reemplazando este valor de  $Z_2$  en la ecuación (53), se vuelve a determinar  $T_2$ . Con este nuevo valor de  $T_2$  se lee  $Z_2$  en la figura A-10, luego con  $Z_2$  volvemos a calcular  $T_2$ . a partir de la ecuación (53), este ejercicio iterativo se hará hasta obtenerse un mismo valor aproximado de  $T_2$ .

### ***Dilatación de materiales***

Durante la operación del pistón se produce disipación de calor dentro del compresor, el cual, genera un incremento de temperatura tanto en el pistón como en el cilindro del compresor. En este capítulo, analizaremos la deformación del pistón y del cilindro por efecto de la temperatura.

A continuación algunos conceptos que emplearemos para el cálculo de las deformaciones.

En el cuadro A-02 del anexo se presenta los coeficientes de dilatación de algunos materiales.

### ***Dilatación Lineal***

Es aquella en la que predomina la variación en una dimensión de un cuerpo, es decir el largo. Ejemplo dilatación en hilos, cabos y barras.

Sean  $L_o$  longitud inicial,  $L_f$  longitud final,  $\gamma$  [ °C<sup>-1</sup> ] coeficiente de dilatación lineal y  $\Delta T$  [ °C ] variación de temperatura, entonces:

$$L_f = L_o(1 + \gamma\Delta T) \quad (54)$$

### ***Dilatación Superficial***

Es el caso donde predomina la variación en dos dimensiones de un cuerpo, es decir, el largo y el ancho.

$$A_f = A_o(1 + 2\gamma\Delta T) \quad (55)$$

### ***Dilatación volumétrica***

Predomina la variación en tres dimensiones de un cuerpo, es decir, el largo, el ancho y el alto.

$$V_f = V_o(1 + 3\gamma\Delta T) \quad (56)$$

### **3.5. Determinación del diámetro del vástago**

En esta parte se calculará el diámetro del vástago del pistón del compresor para una presión máxima de trabajo de 300 psig, un diámetro de pistón de 12 pulgadas y para una longitud de vástago de 68 pulgadas.

Para el análisis se ha considerado como condición de borde un elemento esbelto (vástago) con apoyo en ambos extremos en uno articulado y en el otro empotrado.

Durante la operación del compresor, el vástago del pistón estará sometido a fuerzas axiales de compresión y por tanto estará en pandeo producto de: irregularidades en la forma del vástago, irregularidades en la estructura del material, excentricidad de la carga respecto al centroide geométrico y a pequeñas flexiones del eje. En resumen analizaremos exclusivamente la falla por estabilidad o pandeo del elemento esbelto (vástago).

A partir de la ecuación 38 se determina la fuerza crítica de compresión del equipo de 12 pulgadas de diámetro para una operación de diseño de 300 psi.

$$F = 0.357 \times P f x d^2 = 0.357 \times 300 \times 12^2 = 15415 \text{ kgs}$$

La teoría de pandeo indica que la longitud efectiva o de pandeo ( $L_p$ ) para una barra con este tipo de apoyo es:

$$L_p = 0.7 \cdot L \quad (57)$$

Especificación del material:

Acero de construcción (BOHLER): VCL – 140 (AISI / SAE 4140)

Propiedades:

Acero bonificado con aleación de cromo-molibdeno, muy resistente a la tracción, torsión y flexión. Se suministra en estado bonificado, lo que permite en la mayoría de los casos, su aplicación sin necesidad de tratamiento térmico adicional.

Aplicaciones:

- Partes de maquinarias y repuestos medianos.
- Elementos para la construcción de motores, engranajes, pernos, pines, émbolos, arbolés de transmisión y ejes de bombas.

Características mecánicas:

$$\sigma_F = 715 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 72.93 \frac{\text{Kgf}}{\text{mm}^2} \quad \text{Esfuerzo limite de fluencia para diámetro de barras } 10 - 40 \text{ mm.}$$

$$\sigma_T = 930 - 1130 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Resistencia a la tracción para diámetro de barras de } 10 - 40 \text{ mm.}$$

Método de cálculo:

El método de cálculo a utilizar para elementos esbeltos sometidos a compresión es el METODO EUROPEO (TETMAJER MODIFICADO).

Este método está basado en la recta de Tetmajer, pero en forma simplificada y generalizada. Este método establece unos valores fijos del grado de esbeltes ( $\lambda$ ) para cualquier material que limitan estos rangos de la siguiente manera:

- F = Fallo por Fluencia  $0 \leq \lambda \leq 60$   
 R = Fallo por pandeo según una recta  $60 < \lambda < 100$   
 E = Fallo por pandeo según Euler  $\lambda \geq 100$

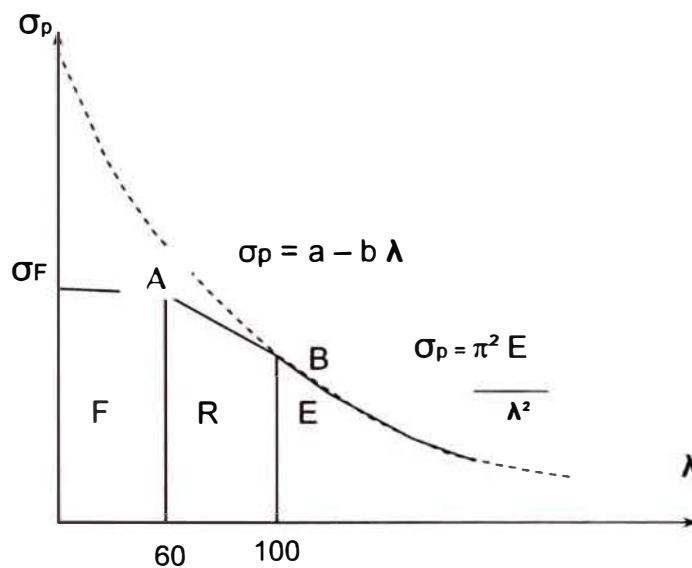


Fig. N°06

Factores de Seguridad (FS) asumidos para elementos de máquinas:

$$FS \begin{cases} 2 = \text{Zona de Fluencia (F)} \\ 3 = \text{Zona de Recta (R) ..... "Tetmajer modificado"} \\ 8 = \text{Zona de Euler (E)} \end{cases}$$

Determinación de las constantes "Q" y "b" de la zona recta (R):

$$\boxed{\sigma_p = a - b \lambda}$$

En el punto A:  $\lambda = 60$

$$\sigma_p = \sigma_F = a - 60b \dots\dots\dots (58)$$



En el punto B:  $\lambda = 100$

$$\sigma_p = \frac{\pi^2 \cdot E}{100^2} = a - 100 \cdot b \quad (59)$$

Restando la ecuación (59) de la ecuación (58) se tiene:

$$\sigma_p - \frac{\pi^2 \cdot E}{100^2} = 40 \cdot b \quad (60)$$

Despejando b de la ecuación 60 se tiene:

$$b = \frac{\sigma_p - \frac{\pi^2 \cdot E}{100^2}}{40} \quad (61)$$

Reemplazando valores en la ecuación 61 para  $\sigma_p = 72.93$ , obtenemos el valor de b.

$$b = 1.30509$$

Reemplazando en (58)

$$\sigma_p = 72.93 = a - (60)(1.30509)$$

$$a = 151.2356$$

Luego, la ecuación de la recta es:

$$\sigma_p = 151.2356 - 1.30509\lambda \quad (62)$$

El esfuerzo admisible de pandeo, según el método Europeo se determinó de la siguiente forma:

$$\sigma_{ADM} \begin{cases} \frac{\sigma_F}{FS} & \text{si } \lambda \leq 60 & \text{Zona F} \\ \frac{a - b \lambda}{FS} & \text{si } 60 < \lambda < 100 & \text{Zona R} \\ \frac{\pi^2 E}{\lambda^2 \cdot FS} & \text{si } \lambda \geq 100 & \text{Zona E} \end{cases}$$

Se debe verificar la relación fundamental para el diseño:

$$\sigma = \frac{F_p}{A} \leq \sigma_{ADM}$$

$\sigma$ : Esfuerzo de trabajo

Entonces :

$$\sigma_{ADM} \begin{cases} 36.465 \text{ Kgf/mm}^2 & \text{Si } \lambda \leq 60 \\ 50.411 - 0.43503 \cdot \lambda & \text{Si } 60 < \lambda < 100 \\ \frac{25907.83}{\lambda^2} & \text{Si } \lambda \geq 100 \end{cases}$$

Plano crítico de pandeo : (Barra maciza)

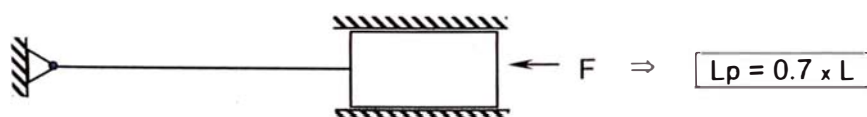


$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$I = \frac{\pi d^4}{64}$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \frac{d}{4}$$

Alrededor del eje x - x / Eje y - y



$$\left\{ \begin{array}{l} L_p = 0.7 L = (0.7) (1733.79) = 1213.65 \text{ mm} \\ \lambda_p = \frac{L_p}{i} = \frac{1213.65}{\left[\frac{d}{4}\right]} = \frac{4854.6}{d} \\ \sigma = \frac{F_p}{A} = \frac{15390.7}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{19596.0}{d^2} \end{array} \right.$$

- Suponiendo: Zona de fluencia (F),  $0 \leq \lambda \leq 60$

$$\sigma = \frac{19596}{d^2} \leq \sigma_{adm} = 36.465 \quad (63)$$

$$\Rightarrow d \geq 23.17 \text{ mm.}$$

Chequeando en la zona de falla por fluencia

$$\lambda_p = \frac{4854.6}{d} = \frac{4854.6}{23.17} = 209.52 \gg 60 \quad \text{NO cumple la Zona de falla por fluencia}$$

- Suponiendo Zona Recta ( R ),  $60 < \lambda \leq 100$ :

$$\sigma = \frac{19596}{d^2} \leq \sigma_{adm} = 50.411 - 0.43503\lambda = 50.411 - 0.43503 \cdot \frac{4854.6}{d}$$

La expresión se reduce a la siguiente ecuación cuadrática:

$$d^2 - 41.494 \cdot d - 388.71 \geq 0 \quad (64)$$

Resolviendo:

- $d \geq 49.7 \text{ mm.}$

$$\lambda_p = \frac{4854.6}{49.7} = 97.68 \quad \begin{array}{l} \text{Cumple el rango de } 60 < \lambda < 100 \\ \text{Si satisface la Zona de falla recta ( R ) de Tetmager modificado} \end{array}$$

**En conclusión:**

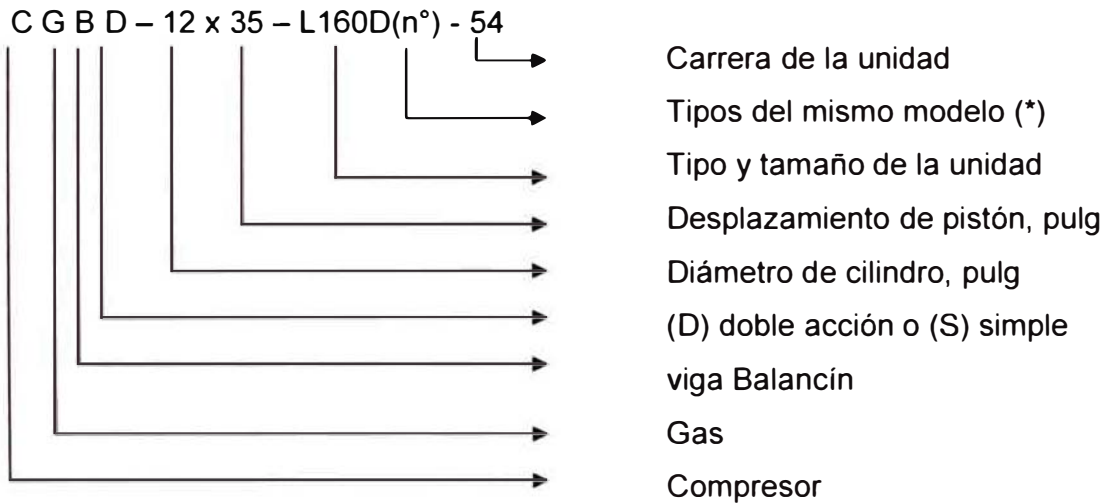
*El material empleado barra de acero bonificado BOHLER VCL – 140 (AISI / SAE 4140) de sección circular “maciza” requiere como mínimo un diámetro de 49.7 mm. para una longitud de vástago de 1733.79 mm.*

*Para barras de acero redondas comerciales:*

$$\text{Diámetro de barra : } \varnothing = 50.8 \text{ mm. (2.0 ")}$$

### 3.6. Denominación del compresor de viga balancín

En adelante la nomenclatura del nombre nominal del compresor de viga Balancín será como el que se muestra a continuación:



(\*) Necesario para diferenciar el modelo de unidades de bombeo de la misma marca. Por ejemplo: (1) para los “Lufkin” modelo C160D-200-74 y (2) para “Lufkin” modelo C160D-212-86.

## CAPITULO IV : PROYECTO PILOTO

### 4.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO PILOTO

El Proyecto Piloto consistió en la implementación de 12 pozos productores de Bombeo Mecánico con compresores de viga balancín de doble desplazamiento (CGBD), con la finalidad de reducir la presión en el anular de los pozos hasta cero de presión manométrica, incrementando de esta manera el diferencial de presión entre el reservorio y el pozo y la productividad de la misma.

La implementación del proyecto tuvo las siguientes fases:

**Fase de visualización**, en esta etapa se analizó la aplicabilidad del dispositivo compresor de viga balancín en los pozos de Noroeste, teniéndose como base información de textos, publicaciones técnicas (SPE), revistas técnicas (World Oil, Petróleo internacional, etc) sobre aplicaciones del dispositivo en diversos campos.

**Fase Conceptual**, En esta parte se recopiló información sobre el aspecto operacional y económico del sistema. En el aspecto operacional, se investigó sobre los componentes principales del equipo, de su mecanismo de funcionamiento y se realizaron cálculos para determinar el tamaño medio del compresor. En el plano económico se realizaron evaluaciones comparativas de la implementación del compresor de viga balancín con respecto a sistemas alternativos de solución (plantas centrales de vacío). Determinándose la viabilidad técnica económica del compresor de viga balancín de fabricación nacional. Asimismo, se seleccionaron los pozos candidatos sobre la base de criterios previamente definidos y que se enuncian posteriormente.

**Fase de Desarrollo**, comprendió de las siguientes sub etapas:

**Diseño**; en esta parte se realizaron cálculos de resistencia de materiales para determinar las características de los componentes principales del compresor

(cilindro, pistón y vástago de pistón). Es decir, se analizaron la deformación y dilatación del cilindro y del pistón del compresor por efecto de la presión y temperatura de operación del sistema. Además se determinaron la capacidad de desplazamiento de cada compresor sobre la base de información de producción de gas, presión de forros, condiciones de trabajo del AIB (carrera de la unidad, emboladas por minuto y tiempo de trabajo) y de la geometría de la unidad de bombeo mecánico.

**Validación de la Información,** En esta tarea se contrastaron información de la base de datos de producción y del inventario de equipos de superficie con la información observada en el pozo (marca del AIB, tamaño del AIB, marca del motor, HP del motor, carrera del AIB, SPM, tiempo de trabajo y condición operativa del AIB y motor), se realizaron mediciones de la geometría del AIB (altura de la viga balancín, distancia del eje central a cabeza del AIB, distancia del eje central a eje del igualador del AIB, etc).

**Construcción e instalación,** Los compresores de viga balancín fueron contruidos en una factoría local, basados en especificaciones de materiales y planos de despiece del equipo definidos y elaborados por el área de Ingeniería de producción. Como parte del control de calidad del producto se exigió al contratista registros radiográficos de los cordones de soldadura y pruebas de hermeticidad del equipo ensamblado.

La fase de construcción consistió de dos etapas, la primera, construcción de 05 compresores y evaluación por un lapso de un mes. Luego, tomando en cuenta las lecciones aprendidas se realizaron cambios en el diseño y se ejecutó la segunda etapa de construcción de 07 equipos adicionales.

Para la fase instalación de los compresores de viga balancín se desarrolló un Instructivo de montaje considerando aspectos de seguridad y medio ambiente establecidas por el sistema de certificación de la compañía y de estándares internacionales. Cabe mencionar, que para la instalación del compresor es necesario modificar el puente de producción para dejar salidas para la succión y descarga del compresor.

## **4.2.- CARACTERISTICAS GENERALES DE LOS POZOS**

Para efectos de evaluación se seleccionaron 06 pozos de la zona Oeste (yacimiento Taiman) y 07 pozos de la zona Norte (05 de Zapotal y 02 de Organos).

A continuación se detallan las características operacionales del sistema extractivo y de reservorios de los yacimientos mencionados.

### **4.2.1. Características Operacionales**

En el cuadro A-04 del anexo se presenta información de las características del equipo de superficie, de las condiciones de operación y de las producciones potenciales de petróleo y gas de los 13 pozos que fueron seleccionados siguiendo los criterios enunciados en el ítem anterior y evaluados con el compresor de viga balancín.

### **4.2.2. Características de Completación**

Con el objeto de encontrar alguna correlación que pudiera existir entre las respuestas de incremento de producción de los pozos con su tipo de completación (formaciones abiertas, cronología, producciones iniciales, etc) se presenta dicha información en los cuadros A-05 y A-06 del anexo.

#### **Zona Oeste**

En el cuadro A-05 del anexo, se presentan algunas características de completación de los pozos del yacimiento Taimán:

- Reservorios principales: Ostrea-Echino-Hélico
- Profundidad de pozo mediano a somero: menores de 4500 pies
- Formaciones completadas en diferentes tiempos
- Producción de múltiples reservorios

- Pozos completados generalmente con tubería de revestimiento de 5 ½"

### **Zona Norte**

Del mismo modo en el cuadro A-06 del anexo, se presentan algunas características de la completación de pozos de los yacimientos Zapotal y Organos:

- Reservorios principales: Mogollón-Ostrea
- Profundidad de los pozos mayores de 7000 pies
- Formaciones completadas en diferentes tiempos
- Producción de múltiples reservorios
- Pozos completados generalmente con forros de 5 ½"

### **4.3. CARACTERISTICAS DE RESERVORIOS Y DE FLUIDOS**

A continuación se describen algunas propiedades de reservorios de las zonas comprometidas con el proyecto piloto.

#### **Zona Oeste – Yacimiento Taiman**

En esta zona se evaluaron 06 compresores de viga balancín en 06 pozos de bombeo mecánico, cuyas características petrofísicas y el nivel de energía de los reservorios en producción se presentan en el cuadro A-07 del anexo.

Particularmente, la formación más importante del yacimiento Taimán es la formación Echino, aquel, tiene una porosidad de 15% y permeabilidad de 0.8 a 1.5 md. Produce crudo de 33.5 °API con gas asociado de 0.64 de gravedad específica, con 89% de contenido de metano y 4.7% de contenido de etano.

Con respecto al nivel de energía la fm. Echino posee la menor gradiente de presión de reservorio (0.15-0.35 psi/pie).



### **Zona Norte – Yacimiento Zapotal**

Como el caso anterior se evaluó los compresores de viga balancín en 05 pozos de bombeo mecánico del yacimiento Zapotal, siendo la formación Mogollón el principal productor de petróleo. Este, posee una porosidad del 6% y permeabilidad de 4 md. Produce un crudo de 29 a 32 °API y gradiente de presión de 0.22 psi/pie. En el cuadro A-08 del anexo se presentan las características petrofísicas e información del nivel de energía de los demás reservorios involucrados en el proceso de producción.

### **Zona Norte – Yacimiento Organos**

También se evaluaron los compresores de viga balancín en dos pozos de Organos Norte, cuyas características de los reservorios productores de hidrocarburos se muestran en el cuadro A-9 del anexo. Igual que el yacimiento Zapotal, la formación Mogollón es la más importante, esta, posee una porosidad del 6%, permeabilidad 1md, y una gradiente de 0.22 psi/pie. Produce un crudo de 35 °API, gas de 0.63 de gravedad específica con un 93% de contenido de metano.

## **4.4. ESTIMACION DEL INDICE DE PRODUCTIVIDAD Y DE LA PRODUCCIÓN INCREMENTAL**

A partir de información de producción, registros de nivel dinámico y de Reservorios se estimaron los índices de productividad de los pozos en evaluación. Para tal efecto, se consideraron las siguientes asunciones:

- Como formación base, el reservorio mas profundo y que esta en producción
- Nivel de referencia para el cálculo de la BHP dinámica la profundidad del asiento de la bomba
- Uso de la producción bruta para el cálculo del PI.
- Uso de la ecuación de Gilbert para reservorios en depleción.

Hallado el índice de productividad y considerando una reducción de presión de forros a cero manométrico determinamos la producción incremental de petróleo de cada pozo.

En el cuadro A-10 del anexo se muestran los datos de entrada y los estimados del índice de productividad y el petróleo incremental de cada pozo.

Según este análisis se esperaría una producción incremental promedia de 0.4 bopd por pozo (4.6% de la producción base).

## **4.5. CALCULOS DE DISEÑO DEL COMPRESOR DE VIGA BALANCIN**

### **4.5.1. Información de entrada**

Para el diseño del compresor de viga balancín se requiere recabar la siguiente información básica.

#### ***4.5.1.1. Características y condiciones de operación del equipo y del pozo***

Es necesario conocer las características del equipamiento de superficie, tales como: marca, modelo, capacidad estructural y torque de la unidad de bombeo mecánico; marca, modelo y caballaje del motor; condición de operación del equipo y del pozo (carrera, emboladas por minuto, tiempo diario de operación, presión de forros y producción promedia diaria del gas). Toda esta información se presenta en el cuadro A-04 del anexo.

#### ***4.5.1.2. Información de la geometría de la unidad de bombeo mecánico***

Para el diseño del compresor de viga balancín también es importante conocer con precisión las dimensiones de la geometría de la unidad de bombeo mecánico, a partir de esta información se podrá determinar la ubicación del compresor en el bombeo mecánico, esta podrá ubicarse entre el poste maestro y la caja reductora o delante del poste maestro (ver Fig. A-07 del anexo).

Las dimensiones de la geometría de las unidades de bombeo de los pozos del proyecto piloto se muestran en el cuadro A-11 del anexo.

#### **4.5.1.3.. Definición de la presión de diseño**

En el cuadro A-04 del anexo se observa que la presión en los forros de los pozos del proyecto piloto están entre 30 a 100 psi y la máxima presión en forros de los pozos de bombeo mecánico potenciales a montar el compresor de viga balancín no excede los 150 psi (ver cuadro A-03 del anexo). Para garantizar un adecuado factor de desplazamiento del compresor se ha convenido considerar una máxima presión de diseño de 300 psi.

#### **4.5.2. Cálculos de Diseño**

A manera de ilustración, diseñaremos el compresor de viga balancín para el pozo Z-01 de la batería B1. Para ello, haremos uso de la información de entrada correspondiente al pozo descrito en los ítems anteriores.

#### **Cálculo de la longitud de desplazamiento del pistón**

Para la siguiente información del pozo tomado del cuadro A-11 del anexo:

Unidad de bombeo: Marca Lufkin modelo C160D-200-74, carrera actual  $s = 54$  pulg, posición superior de anclaje del BCGD:  $x = 62$  pulgs. (supuesto) y  $b = 96$  pulg

Reemplazando estos datos en la ecuación (26):

$$L_d = \frac{54 * 62}{96} = 34.9 \text{ pulg}$$

Se obtiene que la longitud de la carrera del pistón será de  $L_d = 35 \text{ pulg}$ .

### **Cálculo del diámetro del pistón**

El siguiente paso es determinar el diámetro del cilindro del compresor, para el cual, el dato de entrada es la producción de gas del pozo.

Tomando la información del cuadro A-04 del anexo para el pozo Z-01 y reemplazando valores en la ecuación 31 calculamos la producción de gas a 24 hrs:

$$Q_{18.4} = 31 \text{ Mscf/d}$$

$$t = 18.4 \text{ hrs}$$

$$Q_{24} = 40.4 \text{ Mscf/d}$$

El diámetro del pistón para un compresor de acción simple se calcula a partir de la ecuación 34 y para un compresor de acción doble a partir de la ecuación 36 considerando  $Q_{24}$  en vez de  $Q_{cs}$  o  $Q_{cd}$ .

#### **Para un compresor de acción simple:**

Reemplazando valores en la ecuación 34 y haciendo que  $Q_{cs} = Q_{24}$  se tiene:

$$D'_{os} = 11.4 * \sqrt{\frac{40.4}{7.7 * 2.92}}, \quad D'_{os} = 15.3 \text{ pulg.}$$

#### **Para un compresor de acción doble:**

Del mismo modo, reemplazando valores en la ecuación 36 y haciendo que  $Q_{cs} = Q_{24}$  se tiene:

$$D'_{od} = 8.06 * \sqrt{\frac{40.4}{7.7 * 2.92}}, \quad D'_{od} = 10.8 \text{ pulg.}$$

*Dado que el costo del compresor varía directamente con su diámetro del pistón; para una misma capacidad de desplazamiento lo recomendable será elegir un compresor de menor diámetro y de doble acción*

Determinado el diámetro del pistón y el tipo de compresor (acción doble) se calcula la capacidad de desplazamiento de gas del compresor al 100% a partir de la ecuación 35a.

Reemplazando valores:

$$Q_{cd} = \frac{7.7 * 2.92 * 12^2}{65} \quad ; \quad Q_{cd} = 49.75 \text{ Mscf / d}$$

Del mismo, se diseña el tamaño de compresor requerido para los demás pozos del proyecto piloto.

### **Cálculo de la longitud del cilindro**

La longitud del cilindro se determina a partir de la ecuación (27), para ello requerimos conocer el espacio muerto “e” que la calcularemos con la ecuación (30), la longitud de desplazamiento calculado en 35 pulg y la altura del pistón “p” convenido en 6 cms.

Reemplazando valores en las ecuaciones 30 y 27 se tiene que la longitud del cilindro es de 40.66 pulgadas:

$$e = \frac{14.7 * 35}{300} = 1.7 \text{ pulg}$$

$$L_c = 34.9 + 2.36 + 2 * 1.7 = 40.66 \text{ pulg}$$

En resumen el compresor de viga Balancín requerido para el pozo Z-01 de la batería B1 tendrá las siguientes características: diámetro nominal del cilindro

de 12" (diseño por exceso), longitud del pistón 2.36", desplazamiento del pistón 34.9", espacio muerto 1.7" y longitud de cilindro de 40.66".

Siguiendo los lineamientos del ejemplo anterior, se calcularon las dimensiones de los otros compresores para los pozos previamente seleccionados. Los resultados se muestran en el cuadro A-12 del anexo.

El siguiente cuadro resume el tamaño del compresor evaluado y el respectivo pozo en el cual fue puesto en operación:

Cuadro N° 01

Pozo	Batería	Compresor
Z-02	B1	CGBD-12X41-N160-54
Z-03	B1	CGBD-12X36-L160(2)-74
Z-07	B6	CGBD-12X48-L160(1)-74
Z-05	B5	CGBD-10X41-L160(1)-64
Z-13	B3	CGBD-08X41-L160(1)-64
Z-12	B3	CGBD-08X35-L160(1)-54
Z-01 y Z-11	B1 Y B2	CGBD-12X35-L160(1)-54
Z-09	B1	CGBD-12X31-L80-54
Z-06	B1	CGBD-10X56-A160-74
Z-04	B4	CGBD-08X46-S160-64
Z-08	B3	CGBD-08X39-S160-54
Z-10	B6	CGBD-08X32-S160-44

Para la construcción de los compresores se elaboraron planos como el que se muestra en la figura A-05 del anexo.

### ***Análisis del efecto de cargas (fuerzas) en los componentes del compresor***

En esta parte analizaremos la deformación del material del pistón debido al efecto de las cargas (fuerzas) de compresión generadas durante la operación del compresor.

Una máxima presión de trabajo de 300 psig de un compresor de 12" de diámetro genera una fuerza de compresión de 15,423 Kgf.

Analizando el rango elástico del material a partir de la ecuación 46, para un módulo de elasticidad del acero de  $E_{hf} = 1.2 \cdot 10^6 \text{ Kg/cm}^2$  tomado del cuadro A-1 del anexo se tiene:

$$D_o > 25.23 \cdot \sqrt{\frac{15422.727}{1200000}} = 2.86 \text{ cm} = 1.13 \text{ pulg}$$

Significa que trabajando con diámetros de vástago por encima del valor 1.13 pulgadas no hay riesgo de trabajar fuera del rango elástico del material.

***Análisis de la deformación transversal:***

Calculando el diferencial de área a partir de la ecuación 49 y con el valor del módulo de Poisson para el acero  $\mu_{hf} = 0.26$  tomado del cuadro A-1 del anexo se tiene:

$$\partial A = -0.26 \cdot \frac{15422.727}{1200000} = -0.00334 \text{ cm}^2 = -0.0005177 \text{ pulg}^2$$

El signo negativo significa que hay una elongación en la dirección transversal al eje del cilindro del compresor por efecto de las fuerzas sobre el área del pistón.

Cálculo del ensanchamiento del pistón a partir de la ecuación (50):

$$t = 1/2 \cdot \left( \sqrt{\frac{4 \cdot 0.0005177}{\pi} + 12^2} - 12 \right) = 0.000137 \text{ pulg}$$

***La deformación transversal del pistón 0.014 milésimas de pulgada es ilegible.***

## **Temperatura**

Determinaremos la temperatura del proceso a partir de la ecuación de estado de los gases para dos condiciones de desplazamiento del pistón PMS y PMI según Figura N°03.

Condición 1:

$P_1$ ,  $T_1$  y  $Z_1$  a condiciones normales: 14.7 psi, 60°F y 1 respectivamente y el volumen  $V_o$ .

Condición 2:

Presión máxima  $P_2 = 300$  psi,  $V_2 = 1/20 * V_o$ ,  $Z_2$  y  $T_2$ .

Para esta parte es necesario contar con la densidad del gas y el gráfico A-10 del anexo para encontrar  $Z_2$  a partir de un  $T_2$  asumido.

Continuando con el ejemplo pozo Z-01 de la batería B1, donde la gravedad específica del gas es 0.7 (yacimiento Taimán), entrando con este dato en el gráfico A-10 del anexo para un  $T_2 = 100$  °F (asumido) se lee un  $Z_2$  de 0.95.

Reemplazando el valor de  $P_2$  y  $Z_2$  en la ecuación 53 se tiene:

$$T_2 = 1.77 * \frac{314.7}{0.95} = 586^\circ R = 126^\circ F$$

Asumiendo  $T_2 = 126$  °F y entrando al gráfico A-10 se lee nuevamente  $Z_2$  de 0.955, nuevamente reemplazando estos valores en la ecuación 22 se tiene:

$$T_2 = 1.77 * \frac{314.7}{0.955} = 583^\circ R = 123^\circ F = 50.5^\circ C$$

*La Temperatura alcanzada por el proceso será de 50°C o 123°F para la operación del compresor en la unidad del pozo Z-01, en los demás casos se esperan temperaturas cercanas por la similitud en las condiciones operativas.*



Determinado la temperatura alcanzada por el proceso, ahora analizaremos el efecto de la temperatura en los componentes del compresor. Dado que la relación Diámetro – longitud del pistón es de 12"/2.36", es decir 5/1, consideraremos la ecuación 55, para calcular la dilatación superficial del pistón.

Se ha convenido que el material del pistón y cilindro sean de acero. En el cuadro A-2 del anexo se aprecia el coeficiente de dilatación lineal del acero y de otros materiales.

$$\gamma_{ly} = 1.21E - 05 \quad 1/^{\circ}\text{C} \quad \text{para el acero}$$

Cálculo del área del pistón:

$$A_o = \pi \frac{12^2}{4} = 113.1''$$

$$A_f = 113.1(1 + 2 * 0.0000121 * (50.5 - 15.5)) = 113.196''$$

El nuevo diámetro después de la dilatación es:

$$D_f = \sqrt{\frac{4 * 113.196}{\pi}} = 12.0052''$$

Y el incremento radial sería de:

$$(D_f - D_o) / 2 = 0.0052 / 2 = 0.0026$$

*El radio del pistón incrementa 2.6 milésimas de pulgadas por el efecto de la temperatura.*

Del mismo modo, para el análisis de la dilatación del cilindro del compresor, consideraremos un anillo diferencial de diámetro 12" dado que nos interesa conocer la dilatación del acero en la dirección radial.

$\gamma_{ac} = 1.2E - 05 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$       coeficiente de dilatación lineal del acero

$$L_o = \pi * 12 = 37.6992''$$

Reemplazando valores en la ecuación 54 se tiene:

$$L_f = 37.6992 * (1 + 0.000012 * (50.5 - 15.5)) = 37.7150''$$

$$(D_f - D_o) / 2 = 0.0079''$$

*El radio del cilindro incrementa 7.9 milésimas de pulgadas por el efecto de la temperatura.*

Dado que el pistón se dilata 2.6 milésimas de pulgada y el cilindro 7.9 milésimas de pulgada en la misma dirección, significa que la luz cilindro – pistón aumentará 5.64 milésimas cuando el sistema esté en operación.

Para la construcción de los compresores se ha convenido que la luz entre el pistón y el cilindro del compresor sea de 6 milésimas de pulgada.

### ***Determinación de la potencia adicional***

A partir de los datos de operación del compresor (carrera y emboladas por minuto del pistón) y de la presión máxima de trabajo se calcularon la potencia adicional requerida por el sistema utilizando las ecuaciones 37, 38, 39 y 40 descritas en el capítulo III.

En el cuadro A-13 del anexo se muestran las potencias adicionales requeridas por el sistema en cada pozo, en ella se aprecia que se requieren de 0.5 HP a 4 HP, necesiándose mayor potencia en los compresores de mayor diámetro, mayor carrera y mayor emboladas por minuto.

## **4.6. RESULTADOS DEL PROYECTO PILOTO**

### **4.6.1. Resultados de Operación**

En el cuadro A-14 del anexo se muestran los tiempos de operación de cada compresor y los problemas principales que se presentaron durante la evaluación Noviembre de 2006 a Julio del 2007.

En el mismo cuadro se observa que el compresor del pozo Z-10 de la batería B6 tuvo el mayor trabajo con 17,359 carreras, mientras que el compresor de menor trabajo fue el del pozo Z-06 de B-1 con 948 carreras.

### **4.6.2. Paros asociados a correctivos**

Se ha encontrado en promedio 2.1 hrs de paros asociados a correctivos por cada 1000 hrs de operación, la causa más recurrente fue el ajuste y/o cambio de sellos de vástago para evitar la fuga de gas. En el cuadro A-15 del anexo se listan los motivos de paro registrados durante el periodo de evaluación del proyecto piloto.

### **4.6.3. Descripción de fallas**

Las fallas que se presentaron en los compresores de fabricación nacional durante su operación estuvieron relacionados a su diseño, las cuales se describen en el cuadro A-16 del anexo.

#### **4.6.3.1. *Dobladura y rotura de vástagos***

Se produjo debido que el esfuerzo al que fue sometido el vástago del pistón del compresor superó la resistencia admisible de fluencia del material llegando en algunos casos al rango plástico (dobladuras) como en lo sucedido en los compresores de los pozos Z-01 y Z-02 y en otros hasta la rotura caso compresores de los pozos Z-03 y Z-07. Esta falla se originó por que el diámetro

del vástago era de 1 ½" cuando el requerido era de 2" como mínimo. Esta falla típica en elementos esbeltos sometidos a carga de compresión axial es conocido como "falla por estabilidad o de pandeo".

***El problema se superó con el uso de vástagos de 2" de acero BOHLER VCL-140 (AISI/SAE4140).***

#### ***4.6.3.2. Falla de Rodamiento en anclaje superior***

Se originó en el rodamiento de la articulación superior del compresor instalado en el pozo Z-02 después de aproximadamente 55 horas de operación. La falla se dio porque la carga de trabajo de 30.2 KN superaba ampliamente la carga estática del rodamiento 6205 ZZ.

A continuación se da la especificación del rodamiento usado en los primeros CGBD del proyecto piloto.

#### *Rodamiento Rígido de bolas*

Designación:	6205 ZZ
Dimensiones principales:	d= 25 mm D= 52 mm B= 15 mm
Capacidad de carga dinámica:	10.8 KN
Capacidad de carga estática:	6.95 KN

***La falla fue superado con el uso de rodamientos de mayor capacidad de carga estática 37.5 KN (NU2209).***

#### ***4.6.3.4. Falla en sellos de vástago***

Esta falla se presentó en todos los compresores debido a la falta de un sistema de lubricación con grasa, el calor generado debido a la fricción del vástago pulido con las prensaestopas grafitadas de 3/8" en medio seco producían el desgaste prematuro del elemento sello originando fugas de gas por esta parte del compresor.

Con el fin de evitar las fugas, se realizaban la lubricación y/o cambio de prensaestopas quincenalmente, el cual, generaba el empleo de muchas horas de mano de obra.

A pesar de las cualidades de la prensaestopa grafitada, que viene impregnado con lubricante de alto punto de resistencia a la inflamación y escamas finas de grafito, capaz de resistir altas condiciones de trabajo de hasta 200° C y 220 psi y altas velocidades de fricción de hasta 2,000 pies/minuto se producía su desgaste prematuro.

#### 4.6.4. Resultados de Producción por pozo

##### Pozo Z-01, Bateria B1

El comportamiento productivo de la producción del pozo y las condiciones operativas se muestran en el gráfico siguiente.

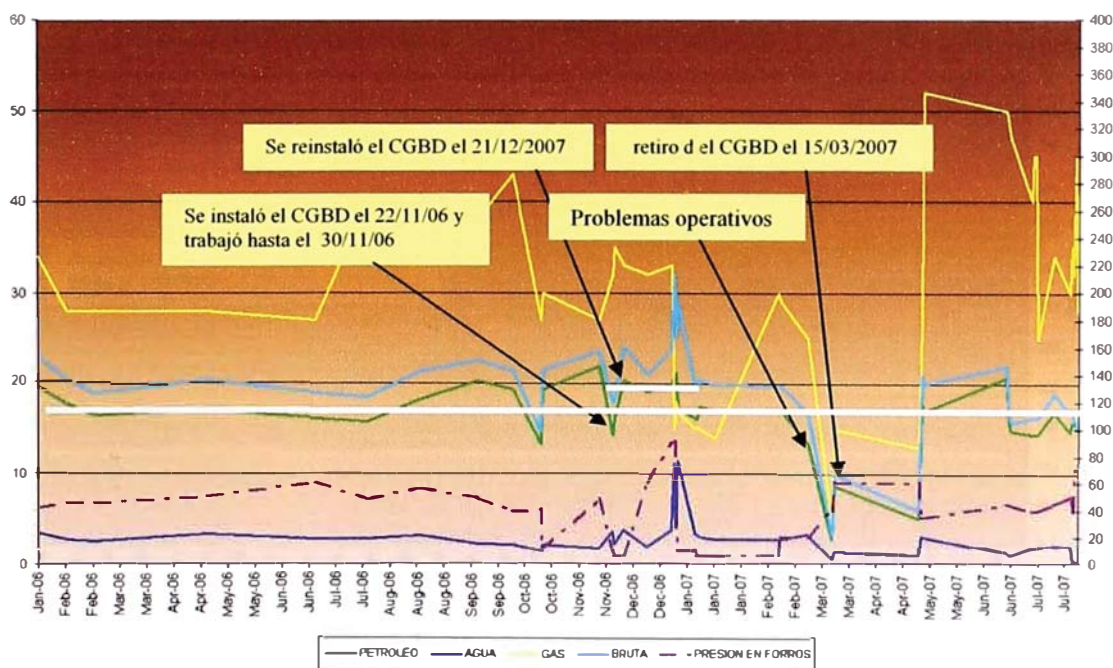


Fig. 07

Información de seguimiento:

Sumerg.=90' (28oct'06)

Prod. Promedia=15.9x3.1x26, S=54", spm=7.8

Fecha	tiempo (hrs)	P.F. (psi)	P.D. (psi)	Sumerg. (pies)
22/11/06	18.4	50	Regul.	NR
27/11/06	18.4	4	50	638
27/12/06	20.8	8	50	340
05/01/07	24.0	6	50	58
26/01/07	24.0	6	50	70
18/04/07	20.0	40	50	55
20/06/07	20.0	45	45	104
25/07/07	20.0	45	45	79

Con la instalación del compresor de viga balancín en la unidad del pozo Z-01, se logró reducir la presión en los forros de 50 psi a 4 psi, esto permitió tener un incremento de la producción de 4 bopd en la última semana del mes de diciembre y unos 2 bopd durante enero y febrero del 2007, se calcula una producción diferencial positiva de 70 bls.

### Pozo Z-02, Batería B1

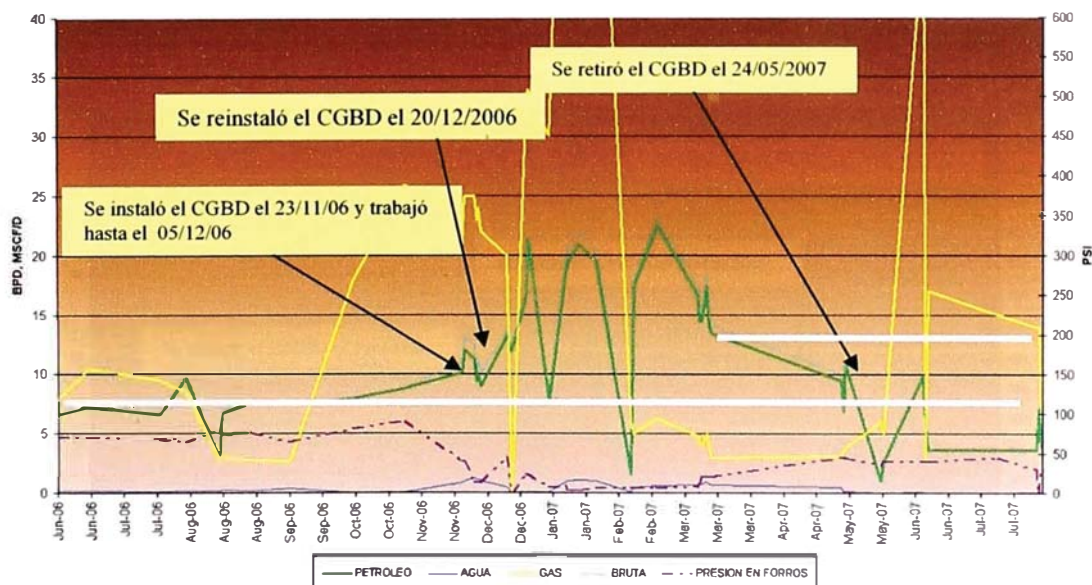


Fig. N°08

Información de seguimiento:

Sumerg.=75' (20/09/06)

Prod. promedia=7.2x0.02x12, S=54", spm=7

Fecha	tiempo (hrs)	P.F. (psi)	P.D. (psi)	Sumerg. (pies)
23/11/06	9.2	92	Regul.	NR
27/11/06	9.2	8	50	128
05/01/07	12.8	6	50	419
26/01/07	17.6	4	50	126
21/03/07	12.8	20	50	63
04/05/07	12.8	40	50	99
25/07/07	12.8	50	50	204
01/08/07	12.8	10	50	595

El comportamiento productivo del pozo es muy sensible a la contrapresión de sus forros, la reducción de la presión en los forros de 92 psi a 4 psi permitió un incremento de la producción en un 180% respecto a su producción promedio por un lapso de casi 03 meses y fue disminuyendo a medida que el equipo fue perdiendo eficiencia de desplazamiento ya que la presión en los forros fue en aumento. El equipo se retiró del pozo el 24 de mayo de 2007 por fuerte ruido en el interior del cilindro, en la inspección se encontró un desgaste total de los sellos y fuerte rozamiento pistón – cilindro.

### Pozo Z-03, Bateria B1

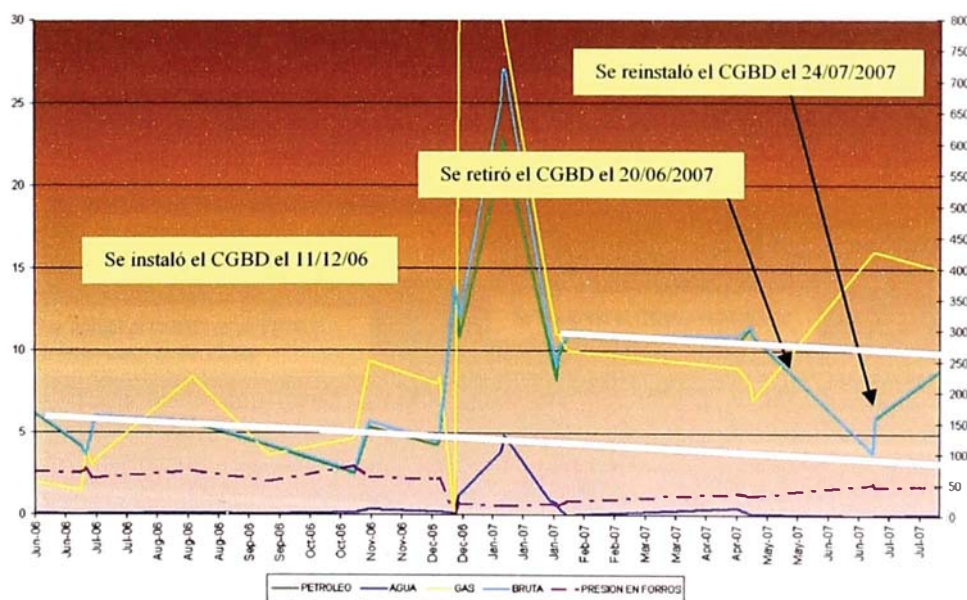


Fig. N°09

Información de seguimiento:

Prod. Promedio=4.8x0.1x6, S=74", spm=7.5

Fecha	tiempo (hrs)	P.F. (psi)	P.D. (psi)	Sumerg. (pies)
11/12/06	2.8	51	Regul.	NR
18/12/06	4.0	16	50	575
05/01/07	8.8	16	50	64
26/01/07	8.0	20	50	74
21/03/07	6.4	30	50	73
06/06/07	2.8	40	50	67
01/08/07	3.6	30	50	438

Al igual que en el caso anterior el comportamiento productivo del pozo Z-03 también fue muy sensible a la contrapresión de los forros. En este pozo se logró reducir la presión en los forros de 51 a 16 psi. A pesar de la reducción parcial de la presión se obtuvo un incremento de la producción de un 212% respecto a su producción promedia por un lapso de 02 meses, estabilizándose luego en 11 bpd por 03 meses, luego el pozo fue disminuyendo su producción a medida que la presión en los forros fue aumentando debido a la pérdida de eficiencia del compresor.

El equipo se retiró del pozo el 20 de Junio de 2007 por incremento en la presión de los forros, en la inspección se encontró un desgaste total de los sellos y se reinstaló el 24 de julio.

### Pozo Z-09, Batería B1

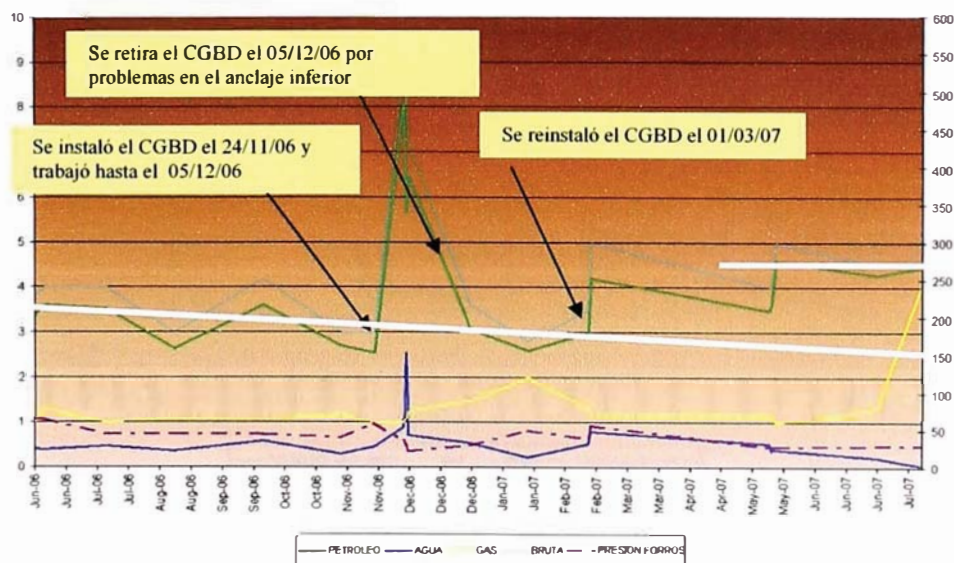


Fig. N°10



Información de seguimiento:

Sumerg.=51' (22Nov'06)

Prod. Promedia=3.1x0.6x1.5, S=54", spm=8

Fecha	tiempo (hrs)	P.F. (psi)	P.D. (psi)	Sumerg. (pies)
24/11/06	1.8	55	Regul.	NR
27/11/06	1.8	35	40	220
04/12/06	2.2	20	40	405
17/01/07	1.8	55	Regul.	70
29/01/07	1.8	55	Regul.	46
04/05/07	3.2	28	40	97

El comportamiento productivo del pozo Z-09 fue bastante similar a lo de los pozos Z-02 y Z-03, el comportamiento productivo del pozo también muy sensible a la contrapresión de sus forros. En este pozo se logró reducir parcialmente la presión en los forros de 55 a 20 psi. A pesar de la reducción parcial se obtuvo un incremento de la producción de un 45% de manera sostenida respecto a su producción promedio.

### Pozo Z-06, Bateria B1

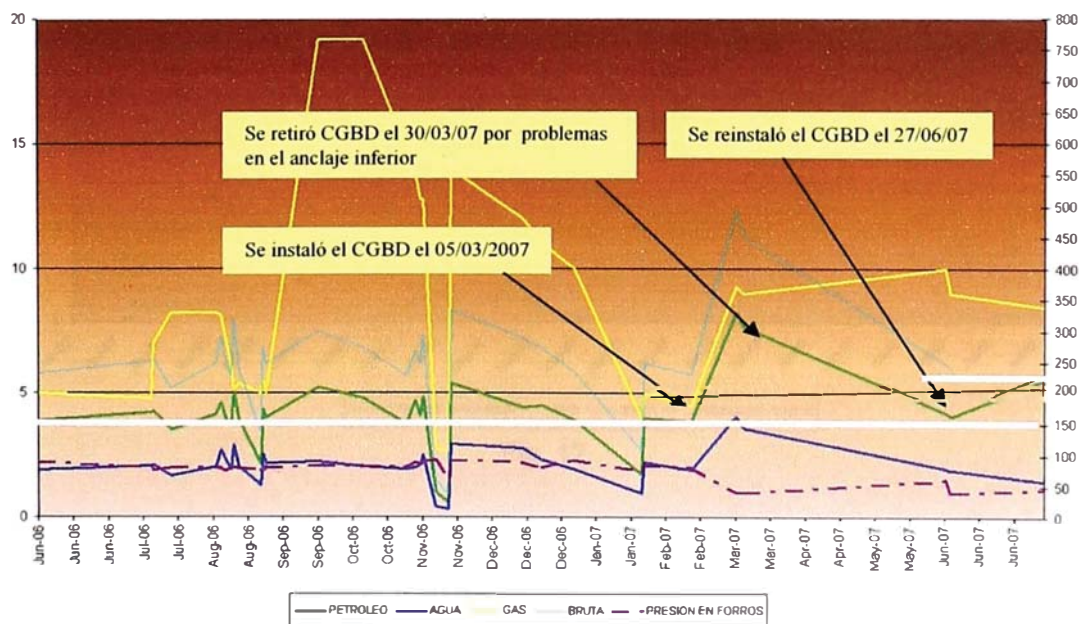


Fig. 11

Información de seguimiento:

Prod. Promedia=3.9x1.8x12, S=74", spm=7.2

Fecha	tiempo (hrs)	P.F. (psi)	P.D. (psi)	Sumerg. (pies)
17/01/07	3.2	80	Regul.	168
16/05/07	3.2	80	Regul.	113
16/07/07	2.8	55	60	80

El comportamiento productivo del pozo Z-06 aún no está bien definido ya que requiere mas datos de ensayos de producción, a pesar de ello observamos una tendencia creciente de la producción para una reducción del 20% de la presión de forros. Lo ideal para este caso es instalar un compresor de mayor capacidad de desplazamiento capaz de captar el gas del anular en el tiempo de trabajo sin llegar al golpe de fluido y reducir la presión en los forros cerca de 0 psig.

**Pozo Z-11, Bateria B2**

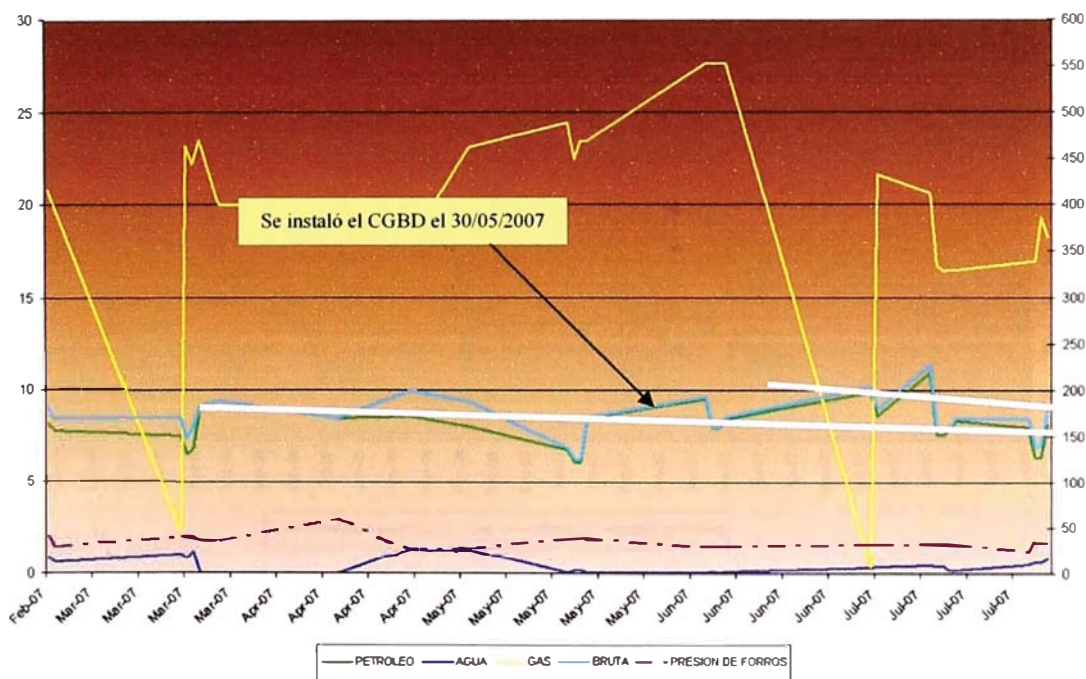


Fig. 12

Información de seguimiento:

Prod. Promedia=8.3x0.5x20, S=54", spm=6.5

Fecha	tiempo (hrs)	P.F. (psi)	P.D. (psi)	Sumerg. (pies)
30/01/07	13.6	40	Regul.	67
18/05/07	12.0	40	Regul.	79

14/06/07	11.2	30	40	97
10/07/07	10.4	30	40	77

El comportamiento productivo del pozo Z-11 al igual que el del pozo Z-6 no estuvo bien definido ya que solo se logró reducir la presión en los forros en un 25%, debido que el pozo requiere un compresor de mayor capacidad de desplazamiento, con todo ello, por un lapso de mes y medio se logró un incremento de 1 bopd, pero por baja sumergencia y temor al golpe de fluido se fue reduciendo el tiempo de trabajo y en consecuencia la producción del pozo fue mermando hasta su producción base.

#### Pozo Z-04, Bateria B4

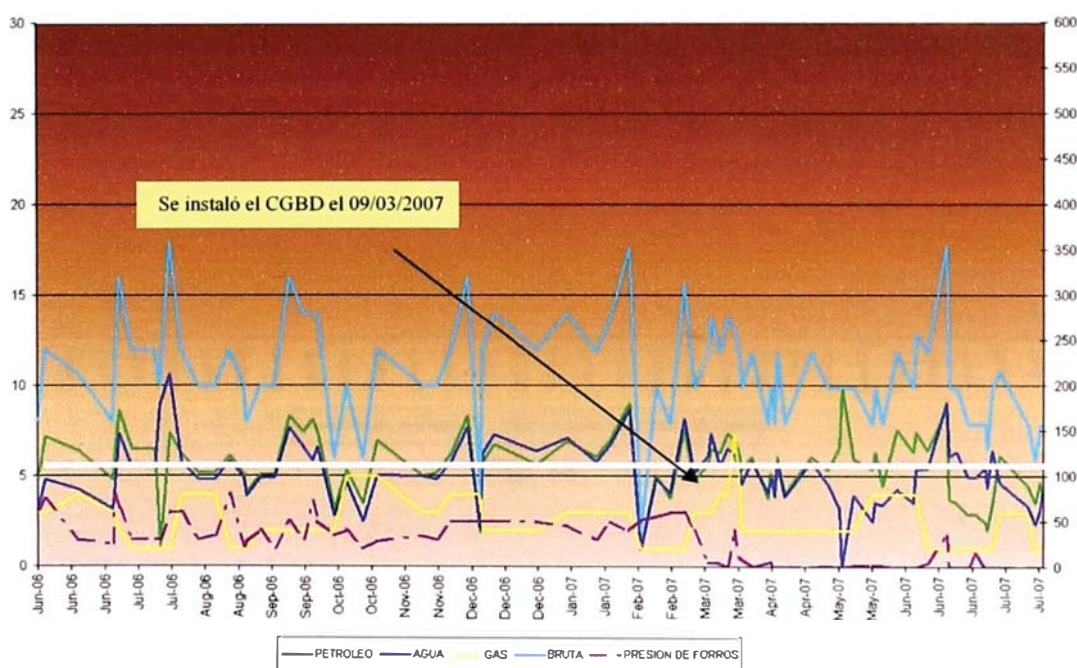


Fig. 13

Información de seguimiento:

Prod. Promedia=5.7x6.4x3, S=64", spm=4.7

Fecha	tiempo (hrs)	P.F. (psi)	P.D. (psi)	Sumerg. (pies)
07/02/07	9.0	60	Regul.	158
23/03/07	9.0	2	30	105
30/05/07	12.8	0	30	51
13/07/07	11.0	0	30	76

Categoricamente en este pozo la reducción de la presión en el anular (0 psi) no contribuyó con el incremento de la productividad del pozo, ya que no se aprecia en la curva de comportamiento productivo del pozo. En este caso el equipo debe ser retirado del pozo para ser instalado en otro.

### Pozo Z-05, Bateria B5

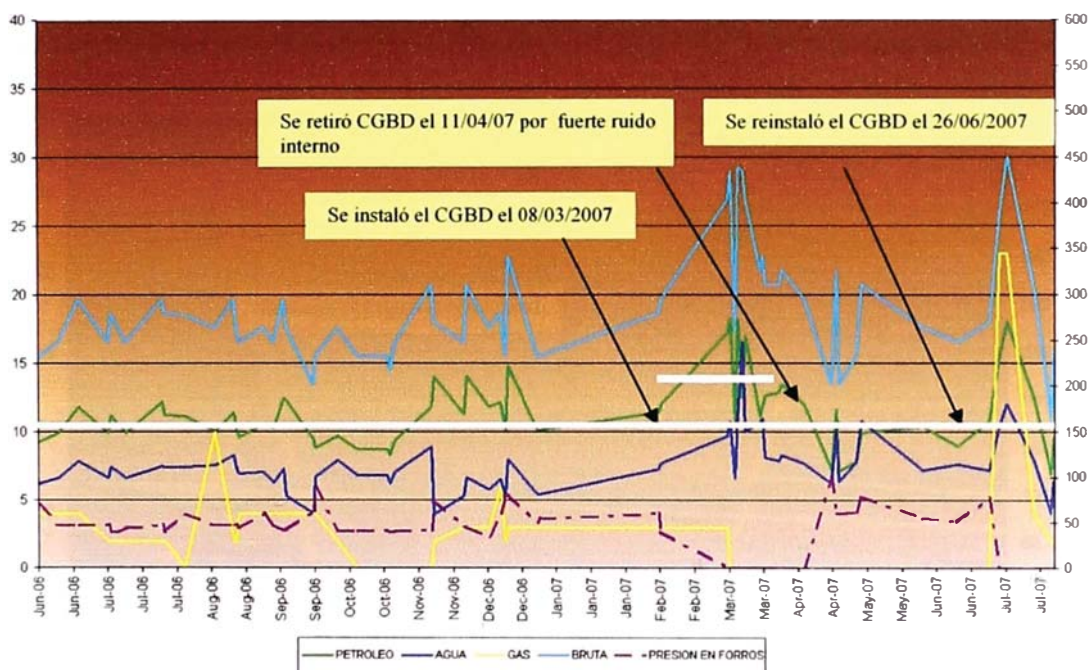


Fig. 14

Información de seguimiento:

Prod. Promedia=10.8x6.4x3, S=64", spm=6.5

Fecha	tiempo (hrs)	P.F. (psi)	P.D. (psi)	Sumerg. (pies)	spm
19/01/07	24	80	Regul.	340	6.5
21/03/07	24	3	80	244	6.5
26/06/07	24	50	80	415	6.5
04/07/07	24	-2	80	727	6.5 Rx subir a 7.5

El comportamiento productivo del pozo Z-05 aún no estuvo bien definido, en la figura se observa una respuesta en la producción muy buena con la reducción de la presión pero faltó definir si esta fue sostenida en el tiempo. Se buscó su estabilización aumentando las carreras por minuto hasta obtener la sumergencia deseada.

### Pozo Z-08, Bateria B3

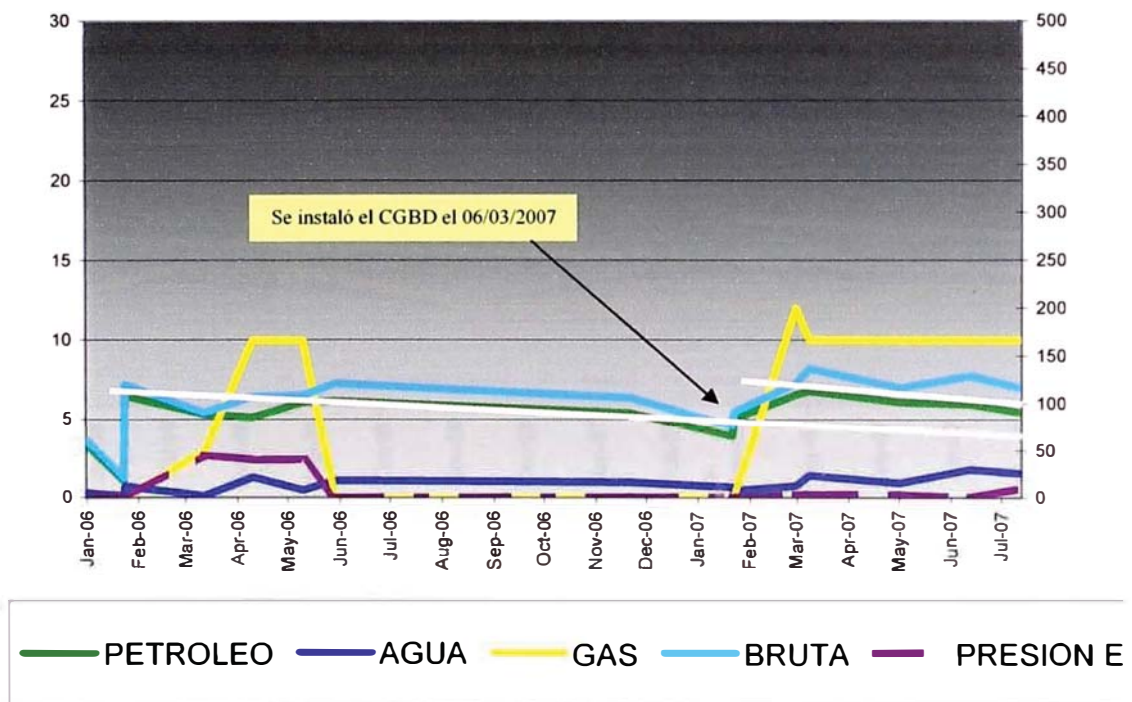


Fig. 15

Información de seguimiento:

Prod. Promedia=5.5x0.8x0, S=54", spm=6

Fecha	tiempo (hrs)	P.F. (psi)	P.D. (psi)	Sumerg. (pies)
07/02/07	12	0	Regul.	143
07/03/07	12	0	50	84
21/03/07	24	0	50	182
11/04/07	7	0	50	263
04/05/07	7	0	50	71

El pozo Z-08 producía con los forros al aire hasta la puesta en operación del compresor de viga balancín, el comportamiento productivo de la producción del

pozo después del compresor mejoró ligeramente en 1.5 bopd en los dos primeros meses para luego ir disminuyendo paulatinamente a 0.5 bopd al cabo de 05 meses de operación. En este pozo se contó con un beneficio adicional ya que se captó los 10 MPC/D de gas asociado que se vendeaba al aire.

### Pozo Z-12, Bateria B3

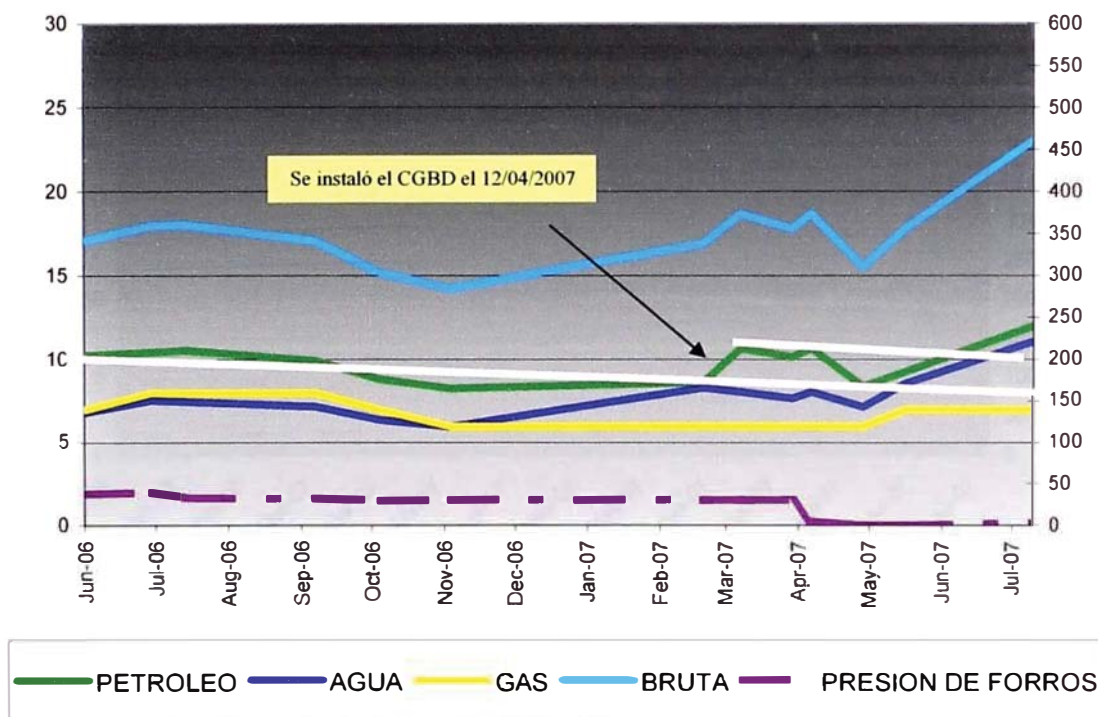


Fig. 16

Información de seguimiento:

Prod. Promedia=9.8x7.3x6, S=54", spm=8.7

Fecha	tiempo (hrs)	P.F. (psi)	P.D. (psi)	Sumerg. (pies)	
07/03/07	16	30	40	235	
04/05/07	17.6	0	40	238	
25/07/07	17.6	3	40	688	Rx timer 19.2 hrs

El comportamiento productivo del pozo Z-12 aún no estuvo bien definido, en la figura se observa una respuesta en la producción con tendencia creciente. Entre el 14 y 17 de Julio el pozo entró en servicio de pozo, un ensayo del día 20 de Julio arrojó una producción de 12 bopd x 11 bapd y el 25 de Julio

después de 7 días de operación el registro de nivel arrojó una buena sumergencia (688 pies) motivo por el cual recomendaron aumentar el tiempo de trabajo a 19.2 hrs desde entonces el pozo no ha sido puesto en ensayo.

### Pozo Z-13, Bateria B3

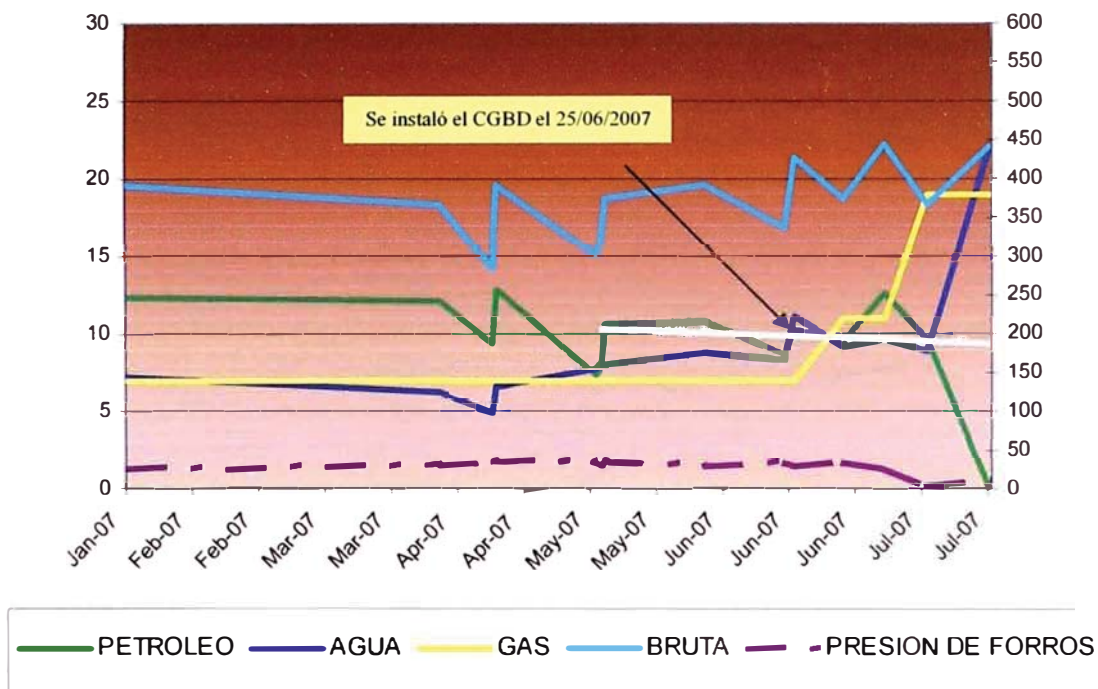


Fig. 17

Información de seguimiento:

Prod. Promedia=10.2x8.7x7, S=64", spm=5.2

Fecha	tiempo (hrs)	P.F. (psi)	P.D. (psi)	Sumerg. (pies)	
28/03/07	19.6	40	Regul.	167	
30/05/07	20.0	40	Regul.	632	
27/06/07	21.2	0	Regul.	721	
04/07/07	23.2	0	40	551	
31/07/07	23.2	4	40	1371	Rx timer 24 hrs

El comportamiento productivo del pozo Z-13 aún no estuvo bien definido, ya que no se alcanzó condiciones estabilizadas durante el tiempo de evaluación. Según el perfil de producción se aprecia un incremento en la producción bruta de unos 03 bppd y en la curva de producción de petróleo no, luego el pozo estuvo en servicio de pozo entre el 24 y 25 de Julio, después del servicio de

pozo un ensayo de producción del pozo arrojó 100% de agua y el registro de nivel tomado el 31 de Julio arrojó 1371' de sumergencia, se esperan ensayos siguientes para definir evaluación.

### Pozo Z-10, Bateria B6

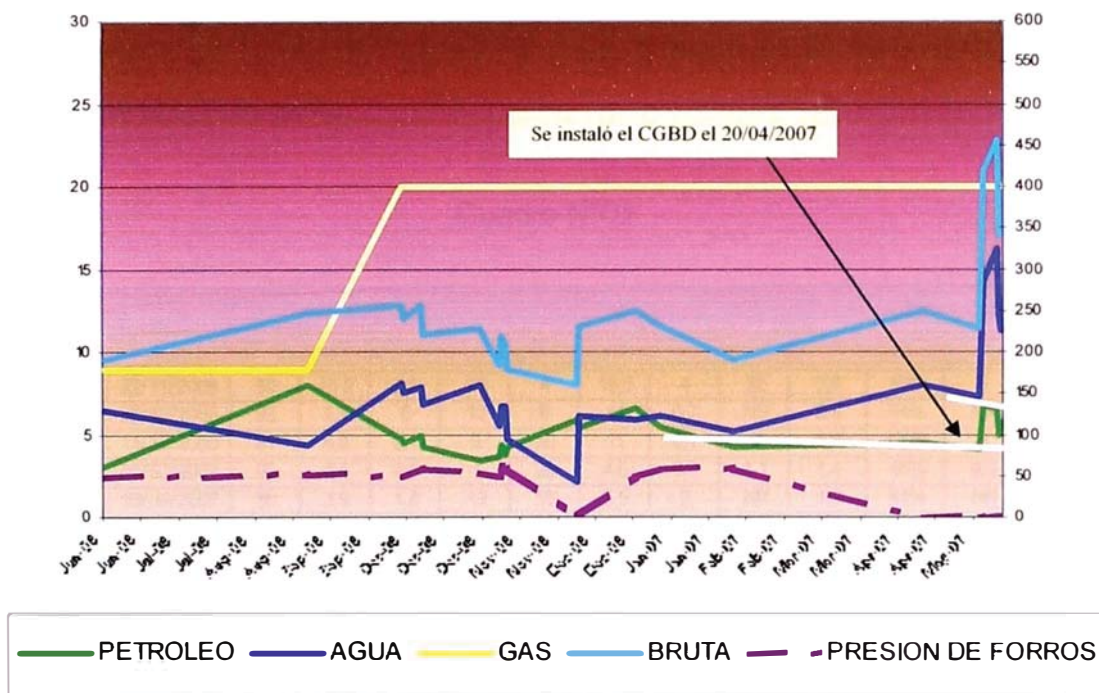


Fig. 18

Información de seguimiento:

Prod. Promedia=4.8x5.4x20, S=44", spm=8.5

Fecha	tiempo (hrs)	P.F. (psi)	P.D. (psi)	Sumerg. (pies)
28/12/06	7.5	70	Regul.	107
10/05/07	24	20	Regul.	252
06/08/07	24	18	60	111

Posterior a la instalación del compresor de viga balancín la curva de producción tanto de petróleo como la bruta del pozo Z-10 mostró un fuerte incremento, 03 bopd adicionales de petróleo (62% de incremento) y 10 bls de bruta (98%).

Debido que la batería B6 entró en remodelación a partir de mediados de Mayo, desde entonces el pozo no cuenta con ensayos de producción, motivo por el



cual no se pudo definir el incremento de productividad del pozo en condiciones estabilizadas. Pero, de manera indirecta podemos inferir que esta a sido importante ya que el tiempo de trabajo del pozo incrementó de 7.5 hrs a 24 hrs.

#### 4.6.5. Resumen de resultados de producción

A continuación el siguiente cuadro comparativo resume los resultados de producción y de la presión de forros antes y después de la instalación del CGBD del proyecto piloto.

Cuadro N°02

POZO	BATERIA	FECHA DE INSTAL	ANTES (Potencial)				DESPUES				INCREMENTO DE PRODUCCION			
			P.F.	PETR.	AGUA	GAS	P.F.	PETR.	AGUA	GAS	PETROLEO		GAS	
			(psi)	(bopd)	(bwpd)	(scf/d)	(psi)	(bopd)	(bwpd)	(scf/d)	BOPD	%	SCF/D	%
Z-01	B1	22/11/2006	50	15,9	3,1	26	4	18,5	4	32	2,6	16%	6	23%
Z-02	B1	20/12/2006	92	7,2	0	12	6	14	0,7	NR	6,8	94%	NR	NR
Z-03	B1	11/12/2006	51	4,8	0,1	6	20	11	0,1	9	6,2	129%	3	50%
Z-09	B1	01/03/2007	55	3,1	0,6	1	20	4,5	0,7	1,1	1,4	45%	0,1	10%
Z-06	B1	05/03/2007	80	3,9	1,8	12	55	5,5	2	NR	1,6	41%	NR	NR
Z-11	B2	30/05/2007	40	8,3	0,5	20	30	9,2	0,2	20	0,9	11%	0	0%
Z-04	B4	09/03/2007	50	5,7	5,9	3	0	5,7	5,9	3	0	0%	0	0%
Z-05	B5	26/06/2007	70	10,8	6,4	3	-2	13	7,5	NR	2,2	20%	NR	NR
Z-08	B3	06/03/2007	0	5,5	0,8	0	0	7	1	10	1,5	27%	10	INDET.
Z-12	B3	12/04/2007	30	9,8	7,3	6	0	10,5	8,5	7,5	0,7	7%	1,5	25%
Z-10	B6	12/04/2007	70	4,8	5,4	20	0	7	12	20	2,2	46%	0	0%
Z-13	B3	25/06/2007	40	10,2	8,7	7	0	10,5	9	11	0,3	3%	4	57%
TOTAL				90,0	40,6	116,0		116,4	51,6		26,4	29,3%		

Asimismo, en el siguiente cuadro se detallan los volúmenes incrementales de petróleo y gas de los pozos evaluados con el compresor de viga balancín.

Cuadro N°03

POZO	FECHA		N° DIAS	PROD. ACUMULADA INCREMENTAL			
	DE	A		PETROLEO (BLS)	PET. TOTAL (BLS)	GAS (MSCF/D)	GAS ACUM. (MSCF)
Z-01	22/11/2006	30/11/2006	8	20	70	6	540
	21/12/2006	13/03/2007	82	50			
Z-02	23/11/2006	04/12/2006	11	37	638	NR	NR
	20/12/2006	24/05/2007	155	612			
	26/07/2007	30/07/2007	4	-10			
Z-03	24/11/2006	25/11/2006	0	0	1513	3	630
	25/11/2006	20/06/2007	208	1505			
	24/07/2007	26/07/2007	2	8			
Z-09	24/11/2006	25/12/2006	11	42	147	0	0
	01/03/2007	18/07/2007	139	104			
Z-07	27/11/2006		0	0	0	0	0
Z-04	09/03/2007	28/07/2007	141	-41	-41	0	0
Z-05	09/03/2007	11/04/2007	33	67	91	NR	NR
	26/06/2007	21/07/2007	25	24			
Z-08	06/03/2007	20/07/2007	136	68	68	10	1360
Z-06	05/03/2007	30/03/2007	25	99	120	NR	NR
	27/06/2007	10/07/2007	13	21			
Z-10	10/04/2007	20/07/2007	101	70	70	0	0
Z-12	12/04/2007	20/07/2007	99	84	84	1,5	149
Z-13	25/06/2007	27/07/2007	32	15	15	4	128
Z-11	30/05/2007	30/07/2007	61	59	59	0	0
				2834	24,5	2807	

El siguiente cuadro y la fig. A-11 del anexo muestran el incremento de producción integral del proyecto piloto de un año de registro, en ella se observa una producción incremental promedio de 17% y un pico de 25% respecto a la producción base.

Cuadro N° 04

Mes	Prod antes CGBD	Prod despues CGBD	Prod Increment. (bopd)	Prod Increment. (bopm)	Porcentaje
1	68,3	71,0	2,7	81,0	4,0%
2	68,0	85,0	17,0	510,0	25,0%
3	67,7	82,0	14,3	429,0	21,1%
4	67,4	80,0	12,6	378,0	18,7%
5	67,1	79,0	11,9	357,0	17,7%
6	66,8	78,5	11,7	351,0	17,5%
7	66,5	78,0	11,5	345,0	17,3%
8	66,2	77,5	11,3	339,0	17,1%
9	65,9	77,0	11,1	333,0	16,8%
10	65,6	76,5	10,9	327,0	16,6%
11	65,3	76,0	10,7	321,0	16,4%
12	65,0	75,5	10,5	315,0	16,2%
				4086,0	

#### 4.6.6. Inversión

##### Costos de fabricación e instalación

Se realizaron en dos etapas:

**Primera etapa:** Se fabricaron 05 compresores bajo un diseño inicial, luego fueron reforzados en sus vástagos y articulaciones para superar algunas fallas de diseño, estos costos se detallan en el siguiente cuadro.

Cuadro N°05

POZO	COSTO INICIAL (US\$)	1° MODIF. (US\$)	2° MODIF. (US\$)	SUBTOTAL (US\$)
Z-07	6,077.60	2,277.13	1,410.42	9,765.15
Z-09	6,077.60	2,204.24		8,281.84
Z-02	6,077.60	2,108.17		8,185.77
Z-01	6,077.60	2,156.18		8,233.78
Z-03	6,077.60	1,781.10		7,858.70
<b>SUBTOTAL</b>	<b>30,388.00</b>	<b>10,526.82</b>	<b>1,410.42</b>	<b>42,325.24</b>

**Segunda etapa:** se fabricaron 07 compresores adicionales, aprovechando las lecciones aprendidas de la primera etapa se incorporaron modificaciones al diseño original, los costos de cada compresor se listan en el siguiente cuadro.

Cuadro N°06

POZO	COSTO INICIAL (US\$)	1° MODIF. (US\$)	2° MODIF. (US\$)	SUBTOTAL (US\$)
Z-12	6,077.59	729.18		6,806.77
Z-06	6,077.59	831.28		6,908.87
Z-10	6,077.59	729.18		6,806.77
Z-04	6,077.59	729.18		6,806.77
Z-13	6,077.59	729.18		6,806.77
Z-08	6,077.59	621.58		6,699.17
Z-05	6,077.59	831.28		6,908.87
<b>SUBTOTAL</b>	<b>42,543.16</b>	<b>5,200.86</b>	<b>0.00</b>	<b>47,744.02</b>

### Costos de modificación de puentes de producción

Se distribuye en mano de obra y materiales serie 300, dentro de los materiales utilizados por pozo son: 02 válvulas, 01 válvula de retención, 02 conexiones en T de 2", 02 válvulas de ½", 02 reducciones de 2" x ½", 02 reducciones de 2"x1/4" y 07 niples roscados de 2".

Cuadro N°07

CONCEPTO	US\$
Mano de obra	150
materiales	850
Total	1000

### Resumen de la inversión por pozo

El resumen de la inversión efectuada por pozo se muestra en el cuadro presentado a continuación

Cuadro N°08

POZO	FABRICACION E INSTAL. (US\$)	MODIF. PUENTE (US\$)	TOTAL (US\$)
Z-07	9,765.15	1000.00	10,765.15
Z-09	8,281.84	1000.00	9,281.84
Z-02	8,185.77	1000.00	9,185.77
Z-01	8,233.78	1000.00	9,233.78
Z-03	7,858.70	1000.00	8,858.70
Z-12	6,806.77	1000.00	7,806.77
Z-06	6,908.87	1000.00	7,908.87
Z-10	6,806.77	1000.00	7,806.77
Z-04	6,806.77	1000.00	7,806.77
Z-13	6,806.77	1000.00	7,806.77
Z-08	6,699.17	1000.00	7,699.17
Z-05	6,908.87	1000.00	7,908.87
Z-11	0.00	1000.00	1,000.00
TOTAL	90,069.26	13000.00	103,069.23

#### 4.6.7. Costo Operativo

Tomando como referencia la información del cuadro A-15 del anexo de los paros registrados por asistencia al compresor de viga balancín de los pozos durante el periodo de evaluación podemos estimar el costo operativo de la operación en conjunto bombeo mecánico con compresor de viga balancín.

Estimando el costo operativo de un año de operación con base a los siguientes parámetros de mano de obra, equipos, costos unitarios de materiales, consumo de materiales y lubricantes, etc. sería el siguiente:

Parámetros de mano de obra y de equipos

Cuadro N° 9

PARAMETROS	COSTOS UNITARIOS	UNIDAD
costo de la energia	0.0334	us\$/bhp-hr
tiempo de trabajo por pozo dia	Variable	hrs
costo mano de obra	7.5	\$/hr
costo de camioneta	6.25	\$/hr
costo cuadrilla (02 h + camioneta)	21.25	\$/hr
costo iba	40	\$/hr
costo cuad. Montaje (03h+hiab)	62.5	\$/hr

Costos unitarios de materiales de consumo

Cuadro N°10

MATERIALES	COSTO UNITARIO	UNIDAD
Prensaestopas	11	\$
Lubricante aceite	8.9065	\$/gln
Lubricante grasa	2.82	\$/kg

Tiempo de intervención de las tareas

Cuadro N° 11

TAREAS	TIEMPO (HRS)
Ajuste de conexiones roscadas	1
ajuste de tuercas de anclaje inferior	1
reajuste y/o cambio de prensaestopa	1
Lubricación vástago	0.5

## Consumo de lubricantes

Cuadro N° 12

CONSUMO LUBRICANTES	CANTIDAD	UNIDAD
aceite (1/8" gln/d)	0.125	gln/d
grasa (01 kilo/mes)	0.25	kg/m

## Frecuencia de intervención anual de las tareas

Cuadro N° 13

TAREAS	FRECUENCIA INTERV. ANUAL
Ajuste de conexiones roscadas	1
Ajuste de pernos de anclaje inferior	1
Reajuste y/o cambio de prensaestopa	6
Mantenimiento general	1
Lubricación de vástago	12

## Costo operativo anual y mensual por pozo

Cuadro 14

Pozo	ajuste conex. Rosc. (US\$)	ajuste pernos anclaje (US\$)	reajuste y/o cambio prensaestopas (US\$)	lubricación (US\$)	Incremento consumo de energía (US\$)	Mantenimiento (US\$)	Consumo de materiales (US\$)	Total anual (US\$)	Total mensual (US\$)	Total día (US\$)
Z-07	21	21	128	128	0	750	437	1485	123,8	4,1
Z-09	21	21	128	128	62	750	437	1547	128,9	4,2
Z-02	21	21	128	128	477	750	437	1962	163,5	5,4
Z-01	21	21	128	128	383	750	437	1868	155,7	5,1
Z-03	21	21	128	128	173	750	437	1658	138,2	4,5
Z-12	21	21	128	128	101	750	437	1586	132,2	4,3
Z-06	21	21	128	128	112	750	437	1597	133,1	4,4
Z-10	21	21	128	128	208	750	437	1693	141,1	4,6
Z-04	21	21	128	128	87	750	437	1572	131,0	4,3
Z-13	21	21	128	128	24	750	437	1509	125,8	4,1
Z-08	21	21	128	128	42	750	437	1527	127,3	4,2
Z-05	21	21	128	128	442	750	437	1927	160,6	5,3
Z-11	21	21	128	128	189	750	437	1674	139,5	4,6

El costo operativo promedio anual es de 1662 US\$ y mensual 138.5 US\$ y para un incremento de 1 bopd sería de 4.6 us\$/bbl.

#### 4.6.8. Análisis Económico

##### Por Pozo

A continuación se presenta una evaluación económica del proyecto piloto por pozo para los siguientes parámetros económicos:

Cuadro N° 15

Precio petróleo s/regalía (US\$/BBL):	60
Regalía:	20%
Precio petróleo c/regalía (US\$/BBL):	48
Factor de fiscalización.	85%
Precio de gas (US\$/Mscf)	2.8

Cuadro N°16

POZO	TOTAL DIAS	PRODUCCIONES			INGRESO (85% PROD. PETR)			INVERSION (US\$)	C.O. (US\$)	FLUJO CAJA (US\$)	TIEMPO DE RECUPERAC (MESES)
		PET. ACUM. (BLS)	GAS (MSCF D)	GAS ACUM. (MSCF)	PETROLEO (US\$)	GAS (US\$)	TOTAL (US\$)				
Z-01 *	90	70	6	540	2861	1512	4373	8583,8	460,4	-4671,2	
Z-02	170	638			26036	0	26036	8535,8	913,7	16586,5	2,1
Z-03	210	1513	3	630	61731	1764	63495	8208,7	953,4	54332,9	1,0
Z-09	150	147	0,1	15	5986	42	6028	8631,8	635,5	-3239,3	7,7
Z-07	0	0			0	0	0	10115,2	0,0	-10115,2	
Z-04	141	0			0	0	0	7156,8	607,2	-7764,0	
Z-05	58	91			3703	0	3703	7258,9	306,1	-3862,0	3,9
Z-08	136	68	10	1360	2788	3808	6596	7049,2	568,6	-1021,8	12,4
Z-06	38	120			4908	0	4908	7258,9	166,2	-2517,1	1,9
Z-10	101	70			2845	0	2845	7156,8	468,2	-4780,0	9,0
Z-12	99	84	1,5	149	3429	416	3845	7156,8	429,9	-3741,7	7,3
Z-13	32	15	4	128	625	358	983	7156,8	141,0	-6314,8	12,4
Z-11 *	61	59			2422	0	2422	350,0	279,7	1792,3	4,4
		2875	24,6	2822	117334	7900	125234	94619,5	5829,9	24684,6	

\* Compresor del pozo Z-01 pasó al pozo Z-11

Del cuadro se observa un beneficio resultante de \$24,700, para 250 días de evaluación (del 22/11/06 a 30/07/2007). En el cuadro se observa que el tiempo de recuperación de la inversión de los pozos con viga balancín va de 1 a 13 meses y solo en casos excepcionales como el Z-04 que no tuvo incremento de producción de petróleo no generó retorno de la inversión.

Cabe señalar que solo 06 pozos con viga balancín tuvieron un tiempo de operación entre 05 y 07 meses, 04 equipos entre 01 y 03 meses de operación, el equipo del pozo Z-04 no generó beneficio y el del Z-07 a la fecha no ha acumulado horas de operación por fallas en el equipo.

## CAPITULO V: NUEVO PROYECTO

### 5.1. ALCANCE

A Mayo del 2007, en Noroeste tierra se contó con aproximadamente 2280 pozos productores de petróleo con el sistema de extracción Bombeo Mecánico de un total de 2480 pozos productores de petróleo que producen con algún sistema de producción artificial. De ellos, el 72% (1635) de los pozos de Bombeo Mecánico pertenecen al Lote donde se desarrolló el proyecto piloto.

A su vez los 1635 pozos de Bombeo Mecánico se distribuyen en función de su tipo en: 92% (1497 pozos) pozos viejos, 5% pozos nuevos perforados en los años 2006 y 2007 y 3% pozos respuesta de proyectos de Recuperación Secundaria (RRSS).

Finalmente, filtrando los 1497 pozos viejos en función de su corte de agua (menores o iguales al 40%) y presión de forros (mayores de 20 psi), se observa que hay 687 pozos potenciales para la aplicación del compresor de viga balancín en pozos de Bombeo Mecánico (ver cuadro A-03 del anexo)..

### 5.2. CRITERIOS DE SELECCIÓN

Para la selección de pozos productores de petróleo candidatos a incrementar su productividad con el montaje del Compresor de Viga Balancín (CGBD) se esbozaron los siguientes criterios:

- Pozos con sistema de producción Bombeo mecánico
- Presión en los forros mayor de 20 psi.
- Carreras de las unidades mayores o iguales a 33".
- Corte de agua menores o iguales al 40%
- Pozos viejos (perforados antes del año 2006 y con retrabajo antes del 2006)



### 5.3. PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO

El proyecto consiste en implementar los 680 pozos de bombeo mecánico productores de petróleo referidos en el alcance y que satisfacen los criterios de selección con Compresores de Viga Balancín para incrementar su productividad reduciendo la presión de fondo dinámico.

La implementación consiste de:

- Levantamiento de información en el pozo del tipo de unidad de bombeo y mediciones de sus dimensiones geométricas.
- Diseño y fabricación de 680 compresores de viga balancín.
- Modificación de puentes de producción (ver fig. A-13)
- Instalación del compresor en la unidad bombeo mecánico (fig. A-12)
- Optimización de la extracción con registro de mediciones físicas y dinamométricas.
- Monitoreo de la producción estableciendo un programa de ensayos de pozos.

### 5.4. EVALUACION ECONOMICA DEL PROYECTO

Procederemos a evaluar el atractivo económico del proyecto tomando como base información obtenida en el proyecto, tales como:

- Producción base a partir de una producción media por pozo de 6 bopd en el primer año y en los demás años declinación de un 6%
- Producción incremental porcentual (15% en el primer año) y declinación de la misma (10% a partir del cuarto año).
- Estimación de la inversión a partir del costo promedio de un compresor de diámetro de 10" y 12" (US\$6000) y del servicio de instalación y modificación del puente de producción (US\$1800).
- Costo de operación de 4.6 US\$/bbl
- Regalía (20%)

El proyecto considera implementarse en tres años, en el primer año 200 compresores, en el segundo 250 y en el tercero 230. En función de este programa se desarrolla el pronóstico de producción base y la producción incremental de petróleo del proyecto.

Los parámetros económicos considerados son las mismas que se usan en los proyectos de la industria petrolera:

- Factor de descuento (20%)
- Impuesto a la renta (30%)

El cuadro A-17 del anexo, muestra los resultados económicos para un tiempo de evaluación de 12 años y para un precio del barril de crudo de US\$60.

El resumen de los resultados de la evaluación económica se muestra a continuación:

Inversión, MMUS\$	5,3
Recuperación adicional, (Mbls)	890
VAN, MMUS\$	8.3
TIR, %	101
Pay out, años	2.0

## 5.5. ANALISIS DE SENSIBILIDAD

Se procedió a realizar varias simulaciones variando los parámetros económicos más importantes (precio del barril de petróleo y la recuperación adicional de petróleo). Los costos de inversión y de operación se consideran invariables por su baja probabilidad de sufrir alteraciones sustantivas.

Se realizaron corridas para las siguientes combinaciones:

Simulación	Parámetro	Variación
1.	Precio	+30%
2.	Precio	-30%
3.	Recuperación	+5%
4.	Recuperación	-5%

Los resultados se muestran a continuación:

Simulación	VAN (MMUS)	TIR(%)	P.O.(años)
1	12.27	141	1.4
2	4.38	62	2.7
3	9.52	113	1.7
4	7.14	89	2.2

## CAPITULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. CONCLUSIONES

- Para el diseño del compresor es muy importante la validación de la información del sistema de base de datos en lo que respecta a la producción de gas y presión de forros, de lo contrario se corre el riesgo de no lograr el objetivo del dispositivo que es reducir la presión del anular del pozo a cero manométrico por quedar el equipo subdimensionado.
- Existen en el área evaluada 687 pozos de bombeo mecánico potenciales para operar con el compresor de viga balancín que producen hidrocarburos con corte de agua menores o iguales al 40% y con presión en los forros mayores o iguales a 20 psi.
- Los pozos de bombeo mecánico de la zona Oeste yacimiento Taimán operando con el compresor de viga balancín tuvieron el mejor comportamiento productivo, seguido de los yacimientos de la zona Norte (Organos y Zapotal), estos alcanzaron un incremento de producción promedio de petróleo respecto a su producción base del orden del 56%, 46% y 11.5% respectivamente.
- La producción de los pozos de la zona Oeste es muy sensible a su presión de forros. En ellos, su productividad aumenta a medida que la presión en sus forros disminuye siempre que la presión de fondo fluyente resultante sea menor.
- Los pozos Z-02, Z-03, Z-09, Z-06 y Z-11 tienen potencial de incrementar aún más su producción, para ello, se debe instalar un compresor de mayor capacidad de desplazamiento para lograr reducir la presión de sus forros a cero manométrico.
- No se encontró una relación directa entre incremento de producción con relación a su producción base, es decir, no siempre se debe esperar mayores incrementos de producción de pozos de mayor producción. Mas bien, se aprecia una relación directa entre incremento de producción con alta relación gas petróleo (GOR).

- El sistema bombeo mecánico con compresor de viga balancín mejora la eficiencia de desplazamiento de la bomba debido que menor cantidad de gas se canaliza a través de la bomba, reduciéndose el efecto de compresión de gas durante la operación de la bomba, asimismo, las producciones de los pozos son mas uniformes en sus ensayos una vez alcanzadas sus condiciones estabilizadas en el fondo del pozo.
- La aplicación del compresor de viga balancín en bombeo mecánico genera aproximadamente 2.1 hrs de paro por cada 1000 hrs de operación. Debido principalmente a lubricación de vástago, ajuste de pernos de anclaje y lubricación de pistón cilindro.
- El tiempo de paro referido a instalación del compresor de viga balancín es de 07 a 09 hrs.
- La lubricación de la prensaestopa y del sello del pistón es fundamental para garantizar mayor vida útil de los sellos y en consecuencia conseguir una alta eficiencia del compresor.
- La calidad del cilindro debe ser de muy baja rugosidad 0.3 micras para garantizar la durabilidad e integridad de los sellos del pistón.
- La aplicación del compresor de viga balancín en bombeo mecánico tiene un costo operativo de 4.6 US\$ para una producción incremental diaria de 1.0 bopd.
- La instalación del compresor de viga balancín en pozos con bombeo mecánico automatizado (Pump Off) sería ideal, ya que la optimización de la producción del pozo sería automática y en menor tiempo, el seguimiento al pozo sería al tiempo de trabajo del sistema y no a los ensayos de producción y a las mediciones físicas.

## 6.2. RECOMENDACIONES

- Como trabajos previos a la instalación del compresor de viga balancín se deben solicitar la inspección de la caja reductora, la estructura de la unidad de bombeo mecánico y el estado del motor eléctrico y/o gas.
- De historiales de producción se debe recabar información de dinamometría respecto a: condición de balance de la unidad, torque de trabajo en la caja reductora y la máxima carga en el varillón pulido. Tener cuidado cuando se desee instalar el compresor de viga balancín en unidades cuyo máximo torque esté en 75% de su nominal, en estos casos se debe hacer cálculos adicionales teniendo muy en cuenta el tamaño del compresor (diámetro, carrera y presión de descarga).
- También se debe verificar la potencia utilizada del motor eléctrico y/o gas. En caso que la potencia esté sobre el 75% de su capacidad nominal, no instalar el compresor sin antes calcular su potencia adicional requerida.
- Para el diseño del compresor considerar un exceso del 20% del valor de la producción de gas reportado en el sistema o del valor medido, es mejor sobredimensionarse. La válvula reguladora nos permite regular la presión en los forros por encima de cero si es que se quiere evitar el vacío.
- Instalar compresores de viga balancín de mayor capacidad de desplazamiento a las existentes en los pozos Z-02, Z-03, Z-09, Z-06 y Z-11 de la zona Oeste Yacimiento Taimán, para reducir más su contrapresión, en lo posible a valores cercanos a cero
- Considerar en la fabricación de nuevos compresores de viga balancín el uso de cilindros de pared interna lisa (rugosidad clase N5 de 0.3 micras), un sistema de lubricación para el sello de vástago y pistón y para las dos rótulas.
- Instalar compresores de viga balancín en pozos de bombeo mecánico con controladores de arranque y parada.

## XX. INFORMACION TECNICA

- McCoy, Charlie "Walking beam-operated compressor offers solution for wellhead compression". Setiembre 2004.
- Rocky Mountain Oilfield Testing Center "Basil Beam Compressor" Project Test results, Julio 1997.
- Alí M Al-Khatib, "Improving Oil and Gas Production with the Beam-Mounted Gas Compressor" SPE 11573, February 1984.
- Rocky Mountain Oilfield Testing Center "Beam Mounted Gas Compressor" Project Test results, March 3, 1998.
- T.E.W. Nind, "Fundamentos de Producción y Mantenimiento de pozos" edición 1987.
- Lester Charles Uren, "Ingeniería de Producción de Petróleo", edición 1965.
- Gabor Takács, "Modern Sucker-Rod Pumping", edición 1992.
- J.N.McCoy, O.L. Rowlan, D.J. Becker, Echometer company, A.L. podio; "How to Maintain High Producing Efficiency in Sucker rod Lift Operations", SPE 80924.

## ANEXOS

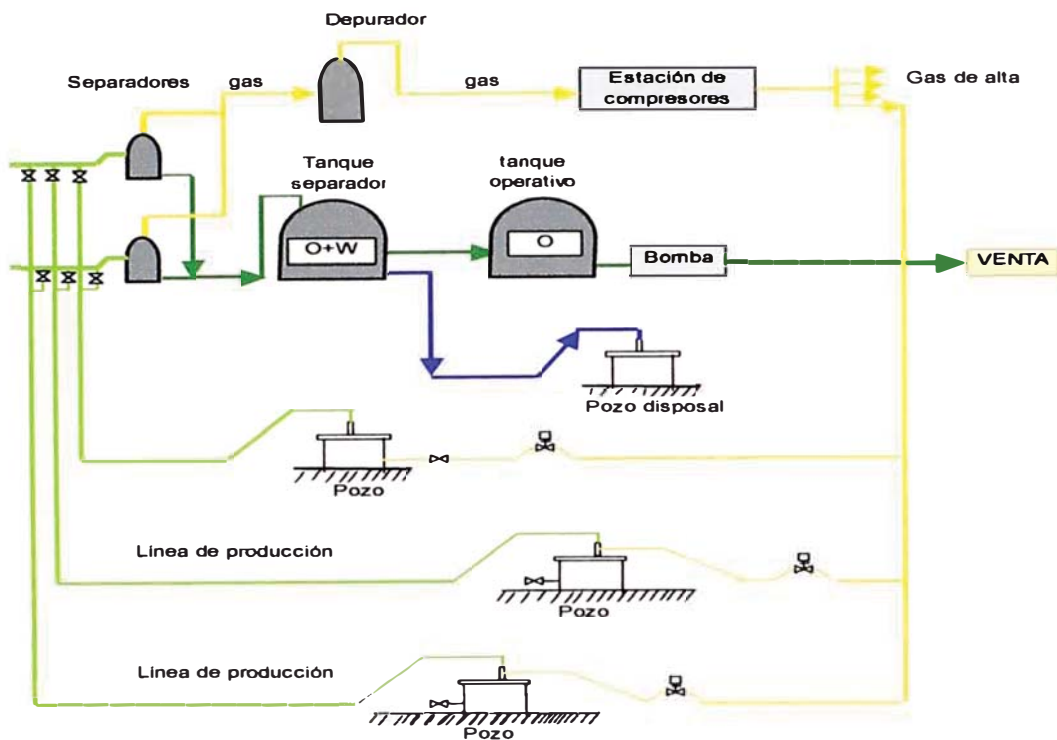


Figura A-01: Sistema de producción de petróleo de un campo

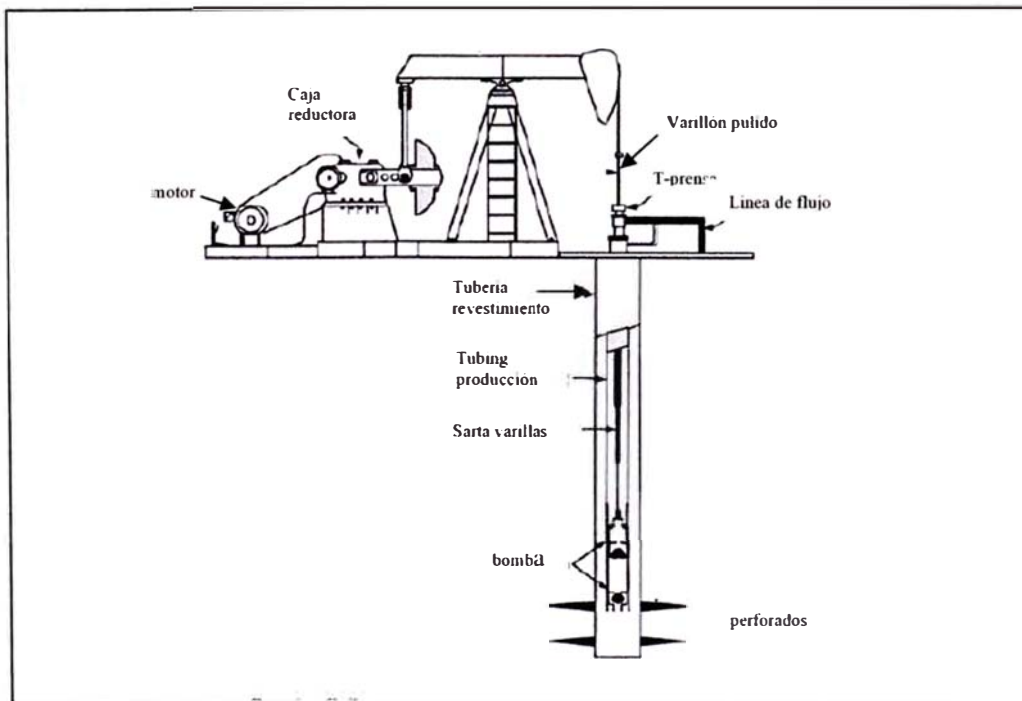


Figura A-02: Instalación típica de Bombeo mecánico



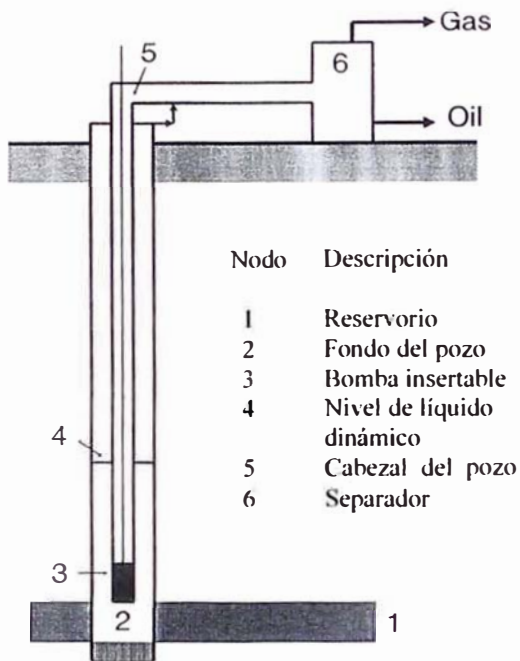


Figura A-03: Sistema de producción de un pozo de Bombeo mecánico

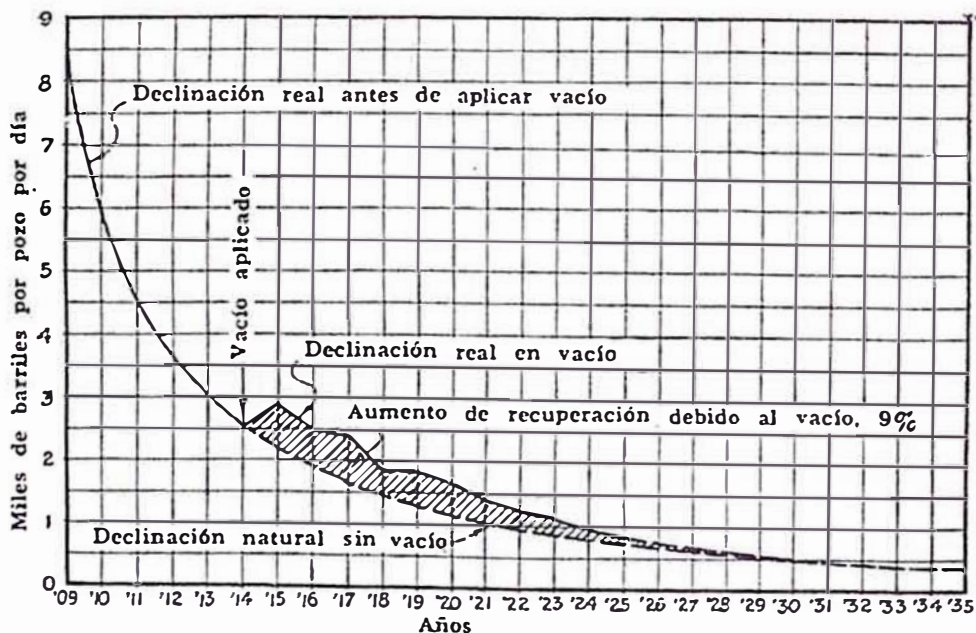


Figura A-04: Gráficas que muestran el aumento de recuperación de petróleo debido a la aplicación de vacío (según B.E. Lindsly y W. B. Berwald)

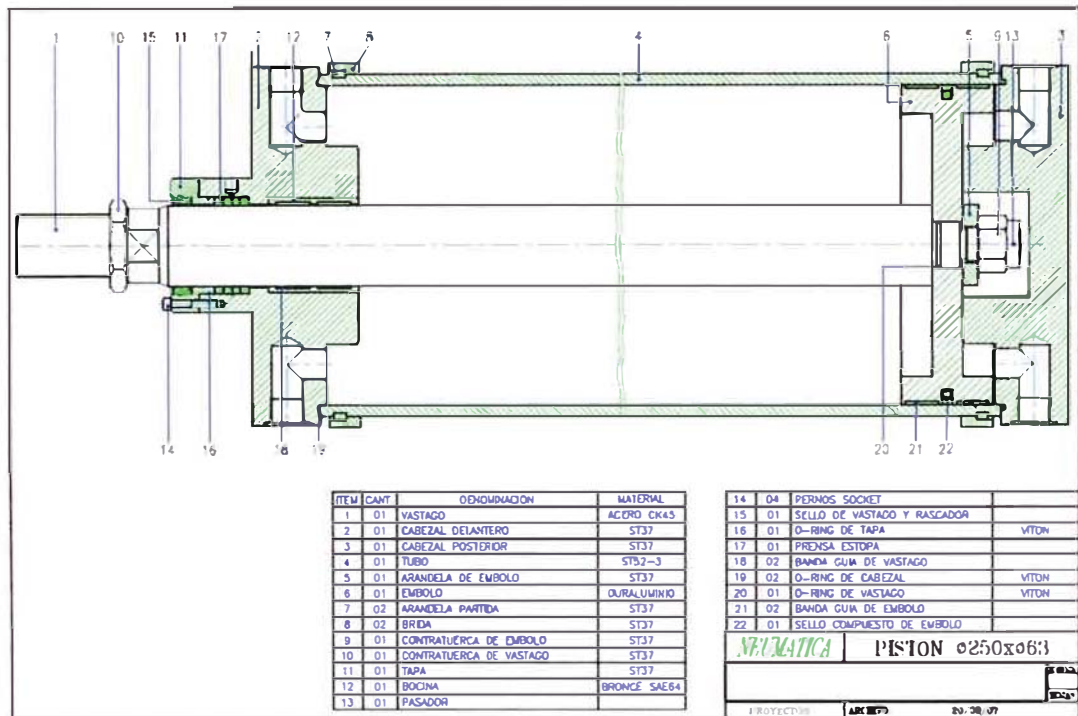


Figura A-05: Plano del CGBD de 250 mm de diámetro y 63 pulg de carrera

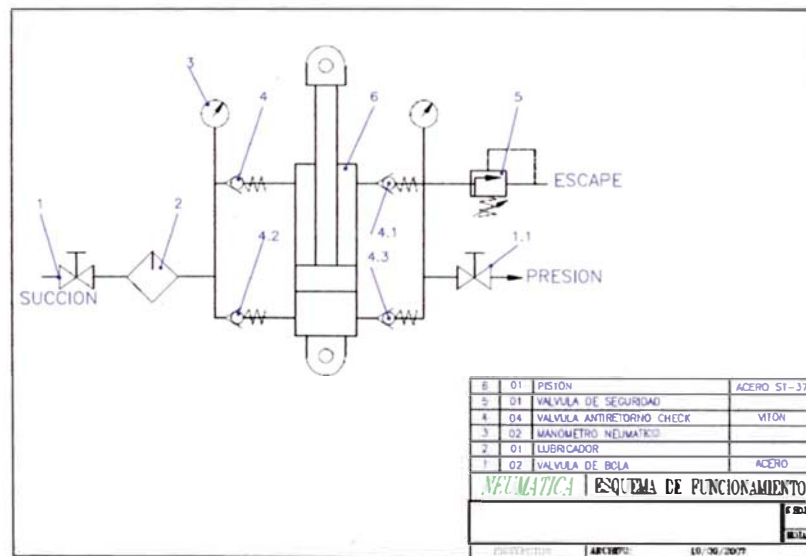


Figura A-06: Diagrama de flujo del sistema



Figura A-07: Posiciones del CGB en la unidad de Bombeo Mecánico

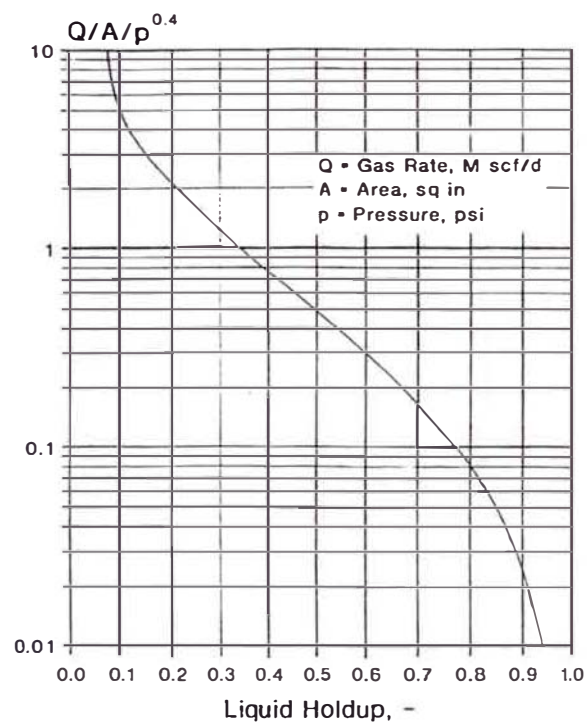


Figura A-08: Curva S de Gilbert , factor de corrección de la gradiente  $H_L$

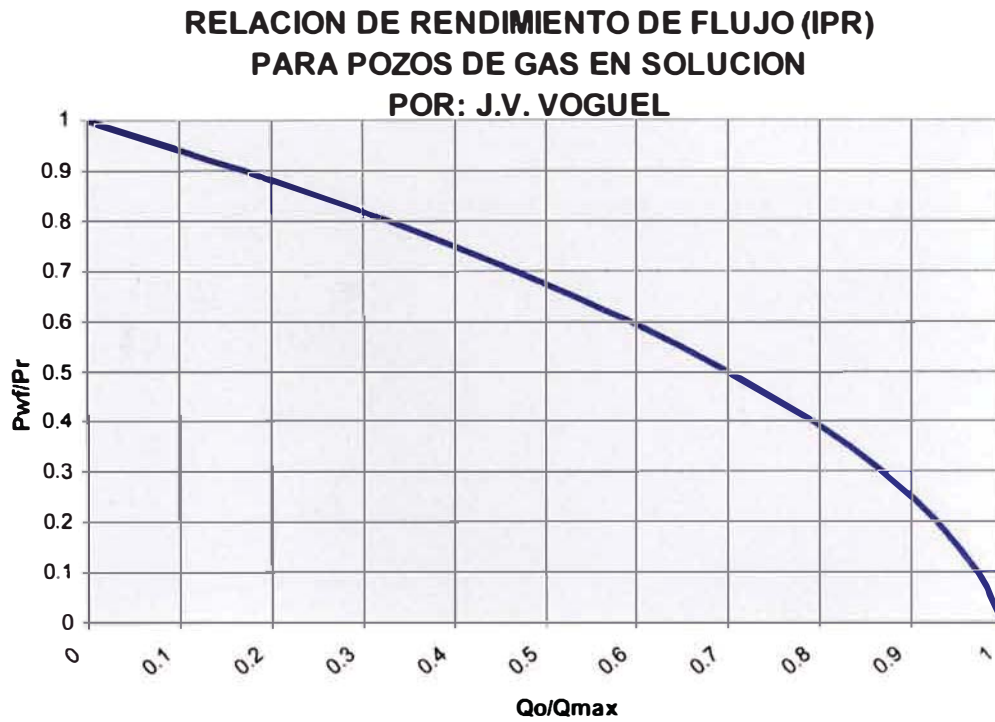


Figura A-09: Curva de Vogel

Material	E (ton/cm <sup>2</sup> )	U
Acero	2000 a 2100	0.22 a 0.33
Aluminio	760	0.32 a 0.36
Hierro fundido	750 a 1600	0.23 a 0.27
Bronce	1100	0.32 a 0.35
Cobre	1160 a 1300	0.31 a 0.34

Cuadro A-01: Módulo de Young y de Poisson de algunos materiales

**Gas Formation Volume Factor  $B_g$  369**

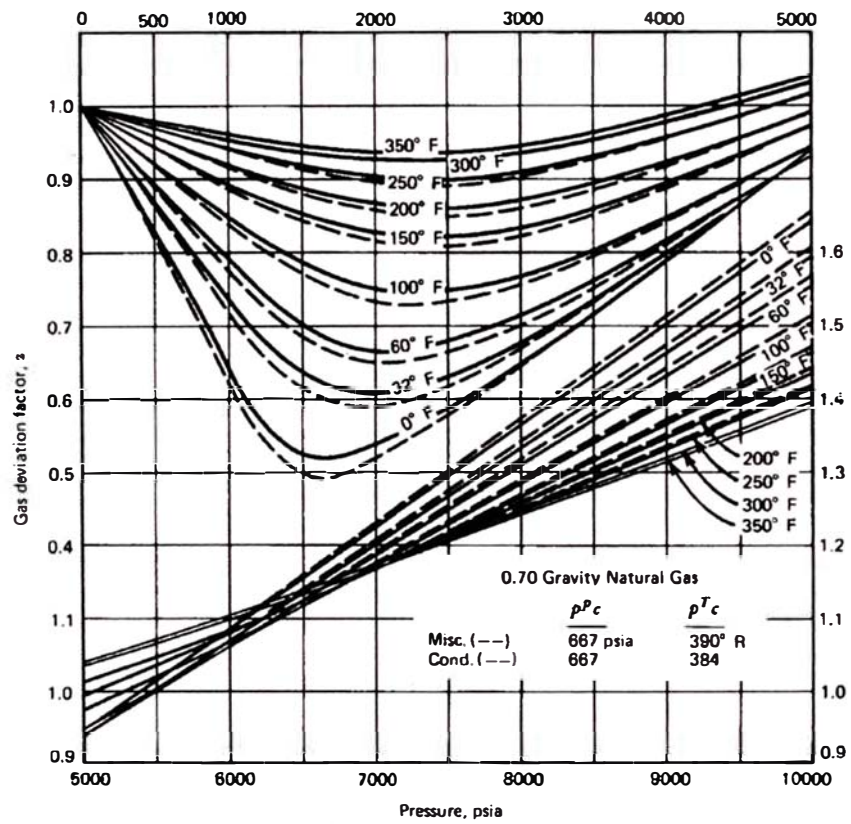


Fig. A-10: Factor de desviación del gas

Material	Coefficiente (1/°C)
Acero	0.0000121
Aluminio	0.0000238
Hierro fundido	0.0000105
Plomo	0.000029
Latón	0.000185

Cuadro A-02: Coeficiente de dilatación lineal de algunos materiales

CORTE DE AGUA <=40%		
PRESION (PSI)	N° POZOS	PORCENTAJE
<=10	255	22%
<=20	452	40%
<=30	752	66%
<=40	932	82%
<=50	1029	90%
<=60	1081	95%
<=70	1100	97%
<=80	1116	98%
<=90	1128	99%
<=100	1133	99%
<=120	1137	100%
<=140	1139	100%
Pozos con PF>20 psi	687	60%

Cuadro N<sup>a</sup> A-03: distribución de pozos según corte de agua y presión de forros

Bat.	Pozo	NA (pies)	MARCA	MODELO	MARCA MOTOR	MOTOR HP	Tiempo (hrs)	GPM	Carrera (pulg)	Poli (bopd)	Pagua (bwpd)	Pgas (Mscf/d)	Pbruta (bpd)	GOR (Mscf/st b)	CORTE AGUA	Presión forros (psi)
B1	Z-01	5.931	LUFKIN	C-160D-200-74	Delcrosa	30	18,4	7,7	54	18,1	3,1	31,0	21,2	1,7	15%	50
B1	Z-02	4.804	NATIONAL	160-200C-74	Delcrosa	18	9,6	7,0	54	6,8	0,0	20,0	6,8	2,9	0%	92
B1	Z-03	3.209	LUFKIN	C-160D-212-86	Acec	30	3,2	7,5	74	5,6	0,1	6,0	5,7	1,1	2%	51
B4	Z-04	7.214	SIMA	160-200-74P	Arrow C-96	20	10,0	4,7	64	6,6	6,4	3,0	13,0	0,5	49%	50
B5	Z-05	7.340	LUFKIN	C-160D-200-74	Ajax EA30	30	24	6,5	64	10,8	6,9	32,0	17,7	3,0	39%	70
B1	Z-06	4.070	AMERICAN	160-173-74	Jiamusi	30	3,6	7,2	74	4,1	2,1	6,0	6,2	1,5	34%	100
B6	Z-07	7.148	LUFKIN	C-160D-200-74	Jiamusi	20	4,4	8,0	74	6,3	5,1	12,0	11,4	1,9	45%	90
B3	Z-08	7.515	SIMA	160-200-74P	Ajax EA30	30	24,0	6,0	54	5,7	1,3	0,0	7,0	0,0	19%	0
B1	Z-09	4.785	LUFKIN	C-80D-133-54	G.E.	20	2,0	8,0	54	3,4	0,6	1,5	4,0	0,4	15%	55
B6	Z-10	6.168	SIMA	C-160D-200-74	Ajax EA30	30	7,3	8,5	44	4,6	6,9	20,0	11,5	4,3	60%	50
B2	Z-11	5.774	LUFKIN	C-160D-200-74	Delcrosa	18	13,6	7	54	9,4	0,0	20,0	9,4	2,1	0%	40
B3	Z-12	7.422	LUFKIN	C-160D-200-74	Delcrosa	30	19,2	8,7	54	8,5	6,5	6,0	15,0	0,7	43%	30
B3	Z-13	7.301	LUFKIN	C-160D-200-74	Jiamusi	20	20,8	5,2	64	10,0	8,0	7,0	18,0	0,7	44%	40
											99,9	47,01	164,5	146,91		

Cuadro N<sup>a</sup> A-04: Características operativas de los pozos del Proyecto Piloto

POZO	TIPO DE EVENTO	FORMACION	INTERVALOS	Tapon (ft)	TIPO DE ENSAYO	FECHA DE EVENTO	RPI / RPR	
Z-01	Completación	Sn Cnstobal	5965 - 5745		Surgente	13/06/1994	116x02x24x3.8"xSF/70	
		Mogollón	5310 - 4400			13/06/1994		
		Ostrea	3397 - 2896			29/06/1994		
		Lutitas Talara	2558 - 2320			29/06/1994		
		Echino Repetido	2007 - 1913			29/06/1994		
	Workover	Echino C Blanco	1208 - 1199		16/02/2000	60x24x1072xPU		
	Workover	Echino Repetido	1153 - 1059	16/02/2000				
	Workover	Ostrea Ey D	4238 - 3693		PU	06/02/2003	43x20x2200xPU	
Z-04	Completación	Echino Repetido	2534 - 1313		Levantamiento Artificial	03/06/1991	25x9x1810xPU	
		Helico	1275 - 1110			04/06/1991	57x8x890xPU	
	Workover	Lut Talara		3470	Swab	18/12/2004	RPI 34x8x2000xPU	
Z-02	Completación	San Cnstobal	4884 - 5077	RBP a 4850	Surgente	02/03/1988	RPI 106x6x743xST PT=120	
	Workover	Mogollón	4805 - 3545		Surgente	07/11/1990	RPR 299x1x433xSF PF=180	
	Workover	San Cnstobal	5077 - 4884		Levantamiento Artificial		25/10/1993	RPR 142x40DEVx1512xPU(62x11)
		Ostrea	3296 - 3127					
		Echino Repetido I	2896 - 2674					
		Lut Talara	2257 - 1999					
		Echino Repetido II	1330 - 548 1185 - 1046					
Z-03	Completación	Echino	3356 - 2825		Levantamiento Artificial	26/03/1988	RPI 81x2x513xPU(42x10)	
	Workover	Lut Talara	2062 - 1832		Levantamiento Artificial	31/07/1992	RPR 9x1xPU(23x7)	
		Echino	3356 - 2825	1260	Swab	06/07/2000	14x6	
		Echino Rep I	1206 - 1105	1070	Swab	12/11/2001	20x20 PF=200 PT=50	
		Echino Rep I	1047 - 463					
Z-06	Completación	Mogollón	3977 - 3499	RBP a 4000	Surgente	04/01/1972	RPI 229x27x1000x24hrs SF=200	
	Workover	Echino	2569 - 2172	Tapon Speed E Line a 2890	Surgente	27/06/1973	RPR 95x0x1267x24Hrs SF=200	
		Mog Helico	1862 - 1662					
		Echino Repetido	1241 - 1040					
	Workover	Mogollón Ech Mbo Hel Ech Rep	4311 - 1040	Perforación tapon	Levantamiento Artificial	04/12/1973	125x0x1705x24HrsxPU	
Workover	Echino Repetido	945 - 501	RBP a 1000	Surgente	15/01/1987	RPR 53x0x24hrs ST=50-90		
Workover	Mog Ech Mbo Hel Ech Rep	4311 - 501	Recupera RP	Levantamiento Artificial	13/04/1987	54x1x1833x24hrsxPU		
Z-11	Completación	Mogollón	5125 - 6301		Surgente	10/01/1977	RPI 75x6x2032 ST	
	Workover	Ostrea	4019 - 2074	Tapon RBP a 4100	Levantamiento Artificial	05/05/1978	RPR 126x1x24hrs	
		Helico	1596 - 1709					
Workover	Ostrea Hel Y Mog	6301 - 1596	Sacan tapon a 4100	Levantamiento Artificial	27/04/1979	91x11x24Hrs x PU		

Cuadro N<sup>a</sup> A-05: Información de completación de los pozos del Proyecto Piloto – zona Oeste

POZO	TIPO DE EVENTO	FORMACION	INTERVALOS	Tapon (ft)	TIPO DE ENSAYO	FECHA DE EVENTO	RPI / RPR
Z-04	Completación	Mogollón	7251 - 6717		Levantamiento Artificial	27/12/1986	RPI 62x29x122xPU
Z-13	Completación	Mogollón	5430 - 7435		Surgente	12/01/1977	260x2 SF=120
	Workover	Echino	2940 - 2880	Tapon EZ-SV a 7480	Levantamiento Artificial	05/08/1991	RPI 73x23-PU(74x10.5)
		Ostrea	3718 - 3106				
		Mogollón	7435 - 5430				
		San Cristobal	7706 - 7531				
Z-05	Completación	San Cristobal	7592 - 7318		Levantamiento Artificial	12/04/1986	116x29x746-PU(128x10)
Z-12	Completación	Mogollón	7235 - 6249		Surgente	07/08/1978	RPI 319x15x224-ST
		Mogollón Repetido	7631 - 5817				
	Workover	Ostrea	5755 - 4943		Surgente	08/11/1985	RPI 51x3x1457 - ST
Z-08	Completación	Mogollón	3570 - 3088		Levantamiento Artificial	30/08/1987	RPI 114x35x1192xPU (100x9)
		Echino	2669 - 2541				
		Mogollón	7699 - 6632				
		San Cnstobal	6549 - 6112				
		Mogollón Repetido	5957 - 4811				
Z-10	Completación	Ostrea	3127 - 2597	Tapon DI, Modificado sin valvula a 6520	Surgente	25/04/1965	199x0 - ST=160 200x0x1700 - ST=200 209x0x1425 - ST=225
		Echinocyamus	2353 - 2221				
		Lut Talara	1551 - 1414				
	Workover	Mogollón	7278 - 3099		Surgente	17/11/1979	76x92x40x24hr - ST=920 (incluye Mogollón)
		Ostrea	4128 - 3242				
		Upper Mogollón	5923 - 6470				
		Lower Mogollón	6568 - 6963				
Z-07	Completación	Mogollón	7422 - 6179		Levantamiento Artificial	05/05/1975	85x64x565x24hrsx PU
	Workover	Ostrea	5096 - 4359		Levantamiento Artificial	09/08/1985	47x5x24hrsx PU
		Echino	3455 - 2836				

Cuadro N<sup>a</sup> A-06: Información de completación de los pozos del Proyecto Piloto – zona Norte

## YACIMIENTO TAIMAN

FORMACION	INTERVALO	ARENA NETA (pies)	POROSIDAD	PERMEAB. (md)	GRAD. ACTUAL	BHP (psi)	API
Mogollón	6000'-4300'	250	10%	0,15	0,2	1100	32
Ostrea	4300'-2800'	295	12%	0,12	0,2	750	34
Echino	2800'-2400'	120	15%	0,80	0.15-0.35	420-900	35
Hélico	2400'-2000'	45	13%	0,35	0,28	650	35
Echino Rep.	2000'-1100'	100	16%	1,50	0,28	450	36

Cuadro N<sup>a</sup> A-07: Propiedades petrofísicas de reservorios de Taimán – zona Oeste

## ZAPOTAL

FORMACION	PROF. MEDIA	ARENA NETA (pies)	POROSIDAD	PERMEAB. (md)	GRAD. ACTUAL	BHP (psi)	API
Mogollón	6920'	500	6%	4.0 - 5.0	0,22	1522	29
Ostrea	4300'	280	8%	0,10	0,28	1204	30
Echino IS	2900'	120	10%	0,40	0,26	754	32
Brechas Talara	2000'	80	10%	0,50	0,25	500	30

Cuadro N<sup>a</sup> A-08: Propiedades petrofísicas de reservorios de Zapotal – zona Norte

## YACIMIENTO ORGANOS NORTE

FORMACION	INTERVALO	ARENA NETA (pies)	POROSIDAD	PERMEAB. (md)	GRAD. ACTUAL	BHP (psi)	API
Mogollón	7500'-5100'	100	6%	1,00	0,2	1260	33
Ostrea	5100'-4200'	85	10%	0,25	0,25	1163	35
Echino IS	4240'-3610'	86	11%	0,50	0,25	981	41
Echino Rep.	1150'-800'	125	12%	0,80	0,22	215	40

Cuadro N<sup>a</sup> A-09: Propiedades petrofísicas de reservorios de Organos – zona Norte



Pozo	Pbruta (bpd)	Corte de agua	P.F. (psi)	NA (pies)	Sumerg. (pies)	Grad. Fluído (psi/pie)	Grad. Reserv. (psi/pie)	API (@60°F)	Formación Base	BHP@NA (psi)	Pwf (psi)	PI (bpd/psi)	Qb incr (bpd)	Qo incr (bopd)
Z-01	21,2	15%	50	5 931	185,0	0,37	0,20	32	Mog	1186	125	0,020	1,0	0,9
Z-02	6,8	0%	92	4 804	75,0	0,37	0,25	34	Ost.	1201	129	0,006	0,6	0,6
Z-03	5,7	2%	51	3 209	60,0	0,37	0,25	35	Ech. IS	802	76	0,008	0,4	0,4
Z-04	13,0	49%	50	7 214	158,0	0,38	0,22	29	Mog	1587	119	0,009	0,4	0,2
Z-05	17,7	39%	70	7 340	244,0	0,38	0,22	29	Mog	1615	176	0,012	0,9	0,5
Z-06	6,2	34%	100	4 070	110,0	0,37	0,25	35	Ech. IS	1017	149	0,007	0,7	0,5
Z-07	11,4	45%	90	7 148	134,0	0,37	0,20	33	Mog	1430	156	0,009	0,8	0,4
Z-08	7,0	19%	40	7 515	84,0	0,38	0,22	29	Mog	1653	80	0,004	0,2	0,1
Z-09	4,0	15%	55	4 786	51,0	0,37	0,25	34	Ost.	1197	80	0,004	0,2	0,2
Z-10	11,5	60%	50	6 168	107,0	0,37	0,20	33	Mog	1234	97	0,010	0,5	0,2
Z-11	9,4	0%	40	5 774	79,0	0,37	0,25	34	Ost.	1444	75	0,007	0,3	0,3
Z-12	15,0	43%	30	7 422	235,0	0,38	0,22	29	Mog	1633	125	0,010	0,3	0,2
Z-13	18,0	44%	40	7 301	167,0	0,38	0,22	29	Mog	1606	111	0,012	0,5	0,3
	146,91												6,7	4,7

Cuadro A-10: Índice de Productividad e incremento de producción de los pozos del Proyecto piloto

MARCA	MODELO	a	b	c	d	e	f
Microlab-Sima	C160D-200-74	83,5	83,5	172,5	14,0	74,0	1,5
Lufkin Conventional	C160D-200-74(a)	96,0	96,0	195,3	15,3	62,0	9,0
Lufkin Conventional	C160D-212-86	96,0	112,0	196,0	16,0	55,0	9,0
Lufkin Conventional	C80D-133-54	64,0	72,0	116,0	12,0	41,0	7,0
Lufkin Conventional	C40-89-42	48,0	56,0	107,0	8,0	24,0	6,3
American Conventional	C320-256-100	99,0	108,0	224,5	16,0	82,0	18,0
American Conventional	C228-213-86	82,5	93,0	178,0	15,5	67,0	17,0
American Conventional	C160-173-74	82,5	79,5	178,0	15,5	67,0	17,0
American Conventional	C114-133-54	72,0	78,0	129,5	10,5	48,0	12,0
American Conventional	C80-119-54	72,0	78,0	129,5	10,5	48,0	12,0
American Conventional	C40-89-42	57,0	60,0	99,5	10,5	37,0	10,0
National Convencional	F160-200C-74	96,0	96,0	171,5	12,0	73,0	12,0

Cuadro A-11: Dimensiones de la geometría de la unidad bombeo mecánico

Pozo	Bateria	AIB	Pd máx (psi)	Carrera (pulg)	Diámetro (pulg)	x (pulg)	b (pulg)	Ld (pulg)	e (pulg)	Lp (pulg)	Lc (pulg)	Relación (Ld/ e)
Z-02	B1	Nat. F160-200C-74	300	54	12	73	96	41,1	2	2,36	47,46	20/1
Z-03	B1	Luf. C160-212-86	300	74	12	55	112	36,3	1,8	2,36	42,26	20/1
Z-07	B6	Luf. C160-200-74	300	74	12	62	96	47,8	2,3	2,36	54,76	20/1
Z-05	B5	Luf. C160-200-74	300	64	10	62	96	41,3	2	2,36	47,66	20/1
Z-13	B3	Luf. C160-200-74	300	64	8	62	96	41,3	2	2,36	47,66	20/1
Z-12	B3	Luf. C160-200-74	300	54	8	62	96	34,9	1,7	2,36	40,66	20/1
Z-01 y Z-11	B1 Y B2	Luf. C160-200-74	300	54	12	62	96	34,9	1,7	2,36	40,66	20/1
Z-09	B1	Luf. C80-133-54	300	54	12	41	72	30,8	1,5	2,36	36,16	20/1
Z-06	B1	Am. 160-200-74	300	74	10	60	79,5	55,8	2,7	2,36	63,63	20/1
Z-04	B4	Sma C160-200-74	300	64	8	60	83,5	46	2,3	2,36	52,87	20/1
Z-08	B3	Sma C160-200-74	300	54	8	60	83,5	38,8	1,9	2,36	44,96	20/1
Z-10	B6	Sma C160-200-74	300	44	8	60	83,5	31,6	1,5	2,36	37,06	20/1

Donde:

- x: posición superior del anclaje del compresor.  
b: distancia del eje central a extremo de cabeza del AIB  
Ld: Carrera del pistón del compresor  
e: espacio muerto entre extremo de pistón y tope de cilindro  
Lp: Cuerpo del pistón  
Lc: longitud del cilindro

Cuadro A-12: características de diseño Del CGBD

Pozo	Prod. Bruta (bpd)	GPM	Carrera (pulg)	Presión forros (psi)	NA (pies)	MARCA MOTOR	Potencia motor (hp)	Desplaz. Pistón (pulg)	Diámetro pistón (pulg)	Fuerza (Kg)	velocidad media (m/s)	Potencia requerida (hp)
Z-01	21,2	7,7	54	50	5.931	Delcrosa	30	35	12	2570,4	0,228	1,57
Z-02	6,8	7,0	54	92	4.804	Delcrosa	18	41	12	4729,5	0,243	3,08
Z-03	5,7	7,5	74	51	3.209	Acec	30	36	12	2621,8	0,229	1,61
Z-04	13,0	4,7	64	50	7.214	Arrow C-96	20	46	8	1142,4	0,183	0,56
Z-05	17,7	6,5	64	70	7.340	Ajax EA30	30	41	10	2499,0	0,226	1,51
Z-06	6,2	7,2	74	100	4.070	Jiamusi	30	56	10	3570,0	0,341	3,27
Z-07	11,4	8,0	74	90	7.148	Jiamusi	20	48	12	4626,7	0,325	4,03
Z-08	7,0	6,0	54	40	7.515	Ajax EA30	30	39	8	913,9	0,198	0,49
Z-09	4,0	8,0	54	55	4.786	G.E.	20	31	12	2827,4	0,210	1,59
Z-10	11,5	8,5	44	50	6.168	Ajax EA30	30	32	8	1142,4	0,230	0,71
Z-11	9,4	7	54	40	5.774	Delcrosa	18	35	12	2056,3	0,207	1,14
Z-12	15,0	8,7	54	30	7.422	Delcrosa	30	35	8	685,4	0,258	0,47
Z-13	18,0	5,2	64	40	7.301	Jiamusi	20	41	8	913,9	0,181	0,44

Cuadro A-13: Potencias adicionales

POZO	BATERIA	COMPRESOR	FECHA DE OPERACIÓN		OPERACION			COMENTARIOS
			DE	A	N° DIAS	HRS.	N° CICLOS	
Z-01	TA24	12 X 35	22-nov-06	30-nov-06	8	167	1 304	dobladura de vástago
			21-dic-06	13-mar-07	82	1 677	13 079	Equipo sin compresión, equipo pasó al Z-11.
					90	1 844	14 383	
Z-02	TA24	12 X 41	23-nov-06	04-dic-06	11	106	739	dobladura de vástago (04/12/06)
			20-dic-06	24-may-07	155	2 205	14 997	Fuerte ruido en el interior del compresor
			26-jul-07	30-jul-07	4	51	358	Trabajando
				170	2 362	16 094		
Z-03	TA24	12 X 36	24-nov-06	25-nov-06	0	8	58	dobladura de vástago
			24-nov-06	20-jun-07	208	1 100	8 250	Mantenimiento preventivo
			24-jul-07	26-jul-07	2	5	36	Trabajando
				210	1 113	8 344		
Z-09	TA24	12 X 31	24-nov-06	05-dic-06	11	23	183	Falla en anclaje inferior
			01-mar-07	18-jul-07	139	445	3 558	Trabajando
					150	468	3 741	
Z-07	OR11	12 X 48	27-nov-06		0	0	0	dobladura de vástago (27/11/06, 24/01/07 y 13/07/07)
Z-04	ZA03	08 X 46	09-mar-07	28-jul-07	141	1 750	14 495	Trabajando
Z-05	ZA04	10 X 41	09-mar-07	11-abr-07	33	792	4 903	Fuerte ruido en el interior del compresor
			26-jun-07	21-jul-07	25	600	4 258	Trabajando
					58	1 392	9 161	
Z-08	ZA02	08 X 39	06-mar-07	20-jul-07	136	952	8 029	Trabajando
Z-06	TA24	10 X 56	05-mar-07	30-mar-07	25	90	648	Falla en anclaje inferior
			27-jun-07	10-jul-07	13	42	300	Trabajando
					38	132	948	
Z-10	OR11	08 X 32	10-abr-07	20-jul-07	101	2 043	17 359	Trabajando
Z-12	ZA02	08 X 35	12-abr-07	20-jul-07	99	1 821	15 841	Trabajando
Z-13	ZA02	08 X 41	25-jun-07	27-jul-07	32	750	4 258	Trabajando
Z-11	TA24	12 X 35	30-may-07	30-jul-07	61	647	4 258	Trabajando

Cuadro A-14: Datos de operación de los CGBD

POZO	BAT.	FECHA INTERV.	TIEMPO OPERACIÓN (hrs)	MOTIVO DE PAROS	DIFERIDA (hrs)	TOTAL HRS. DIFERIDA	HRS DE PARO x 1000 HRS OP.
Z-01	TA24	08-feb-07	1844,0	Lubricación, ajuste de sellos de vástago, limpieza y ajuste de pernos de anclaje	1,0	1,0	0,54
Z-02	TA24	08-feb-07	2362,0	Lubricación, ajuste de sellos de vástago, limpieza y ajuste de pernos de anclaje	1,0	1,0	0,42
Z-03	TA24	13-dic-06	1113,0	Lubricación del rodaje de la articulación	0,5	5,5	4,94
		08-feb-07		Lubricación, ajuste de sellos de vástago, limpieza y ajuste de pernos de anclaje	1,0		
		02-abr-07		Lubricación, ajuste de sellos de vástago, limpieza y ajuste de pernos de anclaje	1,0		
		20-jun-07		Mantenimiento preventivo (retiro de compresor a taller)	3,0		
Z-09	TA24	25-jul-07	468,0	Lubricación, ajuste de sellos de vástago, limpieza y ajuste de pernos de anclaje	1,0	1,0	2,14
Z-04	ZA03	18-abr-07	1750,0	Lubricación, ajuste de sellos de vástago, limpieza y ajuste de pernos de anclaje	1,0	3,0	1,71
		25-abr-07		Lubricación, ajuste de sellos de vástago, limpieza y ajuste de pernos de anclaje	1,0		
Z-05	ZA04	25-jul-07	1392,0	Lubricación, ajuste de sellos de vástago, limpieza y ajuste de pernos de anclaje	1,0	1,0	0,72
Z-08	ZA02	10-abr-07	952,0	Ajuste de pernos de anclaje inferior	0,5	2,5	2,63
		18-abr-07		Lubricación, ajuste de sellos de vástago, limpieza y ajuste de pernos de anclaje	1,0		
		25-jul-07		Lubricación, ajuste de sellos de vástago, limpieza y ajuste de pernos de anclaje	1,0		
Z-06	TA24	25-jul-07	132,0	Lubricación, ajuste de sellos de vástago, limpieza y ajuste de pernos de anclaje	1,0	1,0	7,58
Z-10	OR11	18-abr-07	2043,0	Lubricación, ajuste de sellos de vástago, limpieza y ajuste de pernos de anclaje	1,0	2,0	0,98
		26-jul-07		Lubricación, ajuste de sellos de vástago, limpieza y ajuste de pernos de anclaje	1,0		
Z-12	ZA02	25-jul-07	1821,0	Lubricación, ajuste de sellos de vástago, limpieza y ajuste de pernos de anclaje	1,0	1,0	0,55
Z-13	ZA02	25-jul-07	750,0	Lubricación, ajuste de sellos de vástago, limpieza y ajuste de pernos de anclaje	1,0	1,0	1,33
Z-11	TA24	25-jul-07	647,0	Lubricación, ajuste de sellos de vástago, limpieza y ajuste de pernos de anclaje	1,0	1,0	1,55
PROMEDIO							2,09

Cuadro A-15: Paros asociados a correctivos

POZO	COMPRESOR	DESCRIPCION DE FALLA
Z-01 ( Lv = 1357.63 mm)	CGBD-12x35-L160D(1)-54	Dobladura de vástago (compresor con carga y en funcionamiento) Rodaje superior (6205ZZ) con golpe Fuga por sello de vástago. Rotura en costura de soldadura vástago y articulación
Z-03 ( Lv = 1396.63 mm)	CGBD-12x36-L160D(2)-74	Dobladura y rotura de vástago (compresor sin carga) Fuga de gas por sello de vástago
Z-02 ( Lv = 1521.63 mm)	CGBD-12x41-N160D-54	Dobladura de vástago (compresor con carga y en funcionamiento) Rodaje superior (6205ZZ) completamente destrozado Fuga por sello de vástago Fuerte ruido interior del barril (fricción metal - metal)
Z-09 ( Lv = 1277.62 mm)	CGBD-12x31-L80D-54	Cornimiento de anclaje inferior. Fuga por sello de vástago
Z-07 ( Lv = 1733.79 mm)	CGBD-12x48-L160D(1)-74	Dobladura y rotura de vástago (compresor con carga y en funcionamiento)
Z-04 ( Lv = 1684.02 mm)	CGBD-08x46-S160D-64	Fuga por sello de vástago
Z-08 ( Lv = 1490.98 mm)	CGBD-08x39-S160D-54	Fuga por sello de vástago
Z-05 ( Lv = 1557.02 mm)	CGBD-10x41-L160D(1)-64	Ruido en el interior del barril (fricción metal - metal) Fuga por sello de vástago
Z-06 ( Lv = 1943.10 mm)	CGBD-10x56-A160-74	Cornimiento de anclaje inferior. Fuga por sello de vástago
Z-10 ( Lv = 1297.94 mm)	CGBD-08x32-S160D-44	Fuga por sello de vástago
Z-12 ( Lv = 1386.84 mm)	CGBD-08x35-L160D(1)-54	Fuga por sello de vástago
Z-13 ( Lv = 1557.02 mm)	CGBD-08x41-L160D(1)-64	Fuga por sello de vástago
Z-11 ( Lv = 1357.63 mm)	CGBD-12x35-L160D(1)-54	Fuga por sello de vástago

Cuadro A-16: Fallas de los CGBD durante la evaluación del Proyecto Piloto

### PERFORMANCE DE POZOS CON CGBD

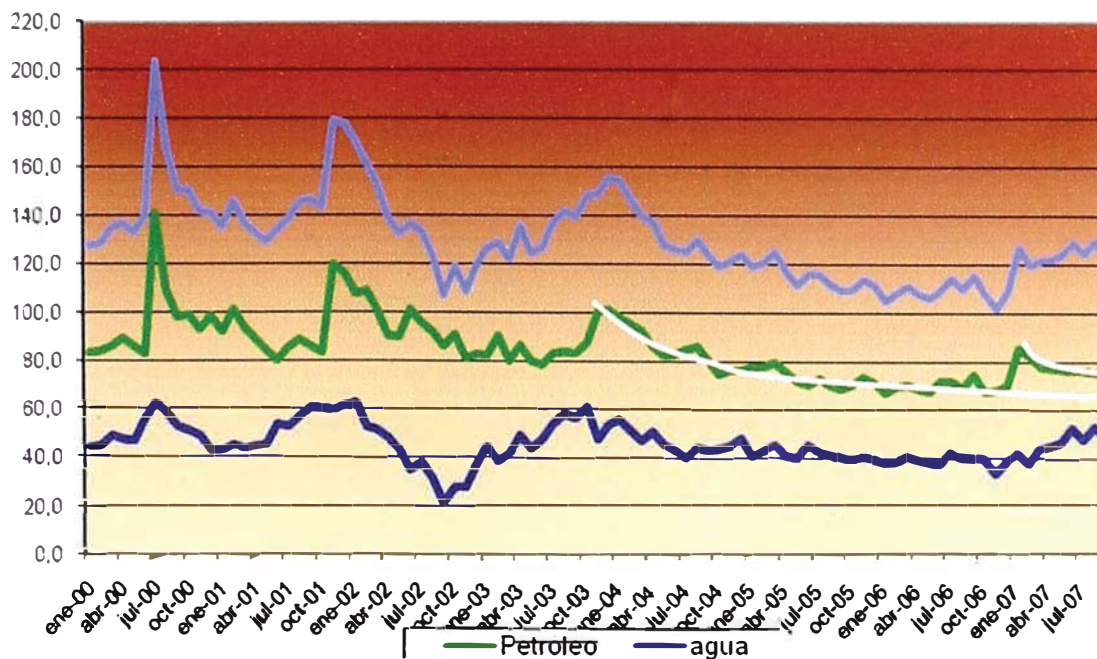


Fig. A-11: Comportamiento productivo de los CGBD durante la evaluación del Proyecto piloto



Fig. A-12: Instalación completa de un compresor de viga balancín



Fig. A-13: puente de producción modificado

## EVALUACION ECONOMICA

### PROYECTO REDUCCION DE LA PRESION EN EL ANULAR DE POZOS CON BOMBEO MECANICO

Datos del proyecto		Parámetros		Resultados	US\$
Nro. De pozos	680	Precio del crudo (US\$/bbl)	60	VAN (20%)	8,327,132
Prod. Prom. por pozo (bopd)	6	Gastos operativos (US\$/bbl)	4.6	VAN (40%)	3,664,375
Declinación prod. Base	6%	Impuesto a la renta	30%	VAN (60%)	1,662,735
Declinación prod. Incrém.	10%	Factor de descuento	20%	VAN (80%)	626,482
Precio del compresor (US\$)	6000	Regalias	20%	VAN (100%)	21,925
Servicios (US\$)	1820			VAN (120%)	-361,070
				VAN (140%)	-618,799
				TIR	101%
				Payout (años)	2.00

AÑO	Nro. POZOS	PROD. BASE	PROD. INCREM. (%)	PROD. INCREM. (BOPD)	INGRESOS (US\$)	GASTOS DE OPERACIÓN (US\$)	DEPRECIACION (US\$)		INGRESOS ANTES DE IMPUESTOS (US\$)	INGRESOS DESPUES DE IMPUESTOS (US\$)	INVERSION (US\$)	FLUJO DE EFECTIVOS (US\$)	FLUJO DE EFECTIVO ACTUAL (US\$)
							TANGIBLES	INTANGIBLES					
											1,564,000.0	(1,564,000.0)	(1,564,000.0)
1	200.0	1,200.0	0.15	180.0	3,153,600.0	302,220.0	240,000.0	364,000.0	2,247,380.0	1,573,166.0	1,955,000.0	222,166.0	185,138.3
2	250.0	2,628.0	0.12	315.4	5,525,107.2	529,489.4	540,000.0	455,000.0	4,000,617.8	2,800,432.4	1,798,600.0	1,996,832.4	1,386,689.2
3	230.0	3,850.3	0.10	385.0	6,745,760.6	646,468.7	816,000.0	418,600.0	4,864,691.9	3,405,284.3		4,639,884.3	2,685,118.3
4		3,619.3	0.09	307.6	5,389,862.8	516,528.5	816,000.0		4,057,334.2	2,840,134.0		3,656,134.0	1,763,181.9
5		3,402.1	0.08	260.3	4,559,823.9	436,983.1	816,000.0		3,306,840.8	2,314,788.5		3,130,788.5	1,258,193.7
6		3,198.0	0.07	220.2	3,857,611.0	369,687.7	576,000.0		2,911,923.3	2,038,346.3		2,614,346.3	875,539.3
7		3,006.1	0.06	186.3	3,263,538.9	312,755.8	276,000.0		2,674,783.1	1,872,348.2		2,148,348.2	599,564.5
8		2,825.8	0.06	157.6	2,760,953.9	264,591.4			2,496,362.5	1,747,453.8		1,747,453.8	406,401.9
9		2,656.2	0.05	133.3	2,335,767.0	223,844.3			2,111,922.7	1,478,345.9		1,478,345.9	286,513.3
10		2,496.8	0.05	112.8	1,976,058.9	189,372.3			1,786,686.6	1,250,680.6		1,250,680.6	201,991.9
11		2,347.0	0.04	95.4	1,671,745.8	160,209.0			1,511,536.9	1,058,075.8		1,058,075.8	142,404.3
12		2,206.2	0.04	80.7	1,414,297.0	135,536.8			1,278,760.2	895,132.1		895,132.1	100,395.0
	680.0			888,627.6	42,654,127.0	4,087,687.2	4,080,000.0	1,237,600.0	33,248,839.9	23,274,187.9	5,317,600.0	23,274,187.9	8,327,131.6

Cuadro A-17: Evaluación económica