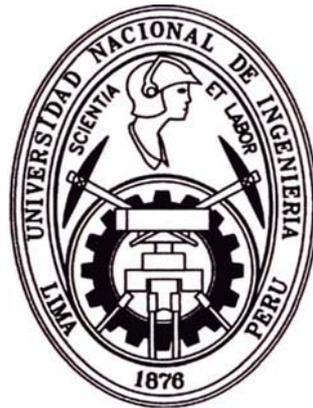


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA DE PETROLEO,
GAS NATURAL Y PETROQUIMICA**



**“BALEO EN CONDICIONES DE BAJO BALANCE
DINAMICO”
(DYNAMIC UNDERBALANCE)**

TESIS

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE PETROLEO

LUIS ALBERTO OLASCOAGA ZAVALETA

PROMOCION 2008-I

LIMA-PERU

2009

DEDICATORIA

A mi hermosa madre Matilde Amelia, a mi padre Luis Alberto por brindarme su apoyo incondicional, para ellos va este trabajo de tesis con mucho amor, de su querido hijo...

Luis Alberto

INDICE

1.-INTRODUCCION	5
2.-BREVE RESEÑA HISTORICA SOBRE BALEO	7
3.-CONDICIONES DE BALEO	9
3.1.-BAJO BALANCE (UNDER BALANCE)	9
3.2.-SOBRE BALANCE (OVER BALANCE)	12
4.-COMPONENTES DEL SISTEMAS DE BALEO	14
4.1.-EQUIPO DE CONTROL DE PRESION DE SUPERFICIE	14
4.1.1.-CABEZA DE EMPAQUE (STUFFING BOX)	15
4.1.2.-EL LUBRICADOR (RISER)	16
4.1.3.-EL BOP	17
4.2.-EL CABLE (WIRELINE)	19
4.2.1.-CONSTRUCCION DEL CABLE	19
4.2.2.-SELECCIÓN DEL CABLE	20
4.3.-LA ESCOPETA (PERFORATING GUN)	22
4.3.1.- LAS CARGAS	23
4.3.2.-EL PORTADOR DE CARGAS	26
4.3.3.-EL CORDÓN DETONANTE	31
4.3.4.-EL DETONADOR	32
5.-METODOS DE BALEO	35
5.1.- CABLE (WIRELINE CONVEYED PERFORATING)	35
5.1.1.-BALEO A TRAVES DE LA TUBERIA DE PRODUCCION	35

5.1.2.-BALEO A TRAVES DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO	37
5.2.-TUBERIA DE PRODUCCION (TUBING CONVEYED PERFORATING)	39
5.3.-TUBERIA FLEXIBLE O ENROLLABLE (COILED-TUBING CONVEYED PERFORATING)	47
6.-NUEVO METODO DE BALEO	50
6.1.-INTRODUCCION	50
6.2.-BAJO BALANCE DINAMICO (DYNAMIC UNDERBALANCE PERFORATING)	52
7.-SELECCIÓN DE POZOS CANDIDATOS	59
8.-APLICACIONES RECIENTES	60
8.1.-CAMPO DE BRADY-EEUU (FEBRERO 2004)	60
8.2.-CAMPO DE SACHA-ECUADOR (OCTUBRE 2005)	73
8.3.-CAMPO DE SANTA ANA-VENEZUELA (FEBRERO 2008)	82
9.-CONCLUSIONES	103
10.-RECOMENDACIONES	105
11.-BIBLIOGRAFIA	106

1. INTRODUCCION

Todo pozo entubado debe ser comunicado con la formación por medio del baleo o disparo para que los fluidos dentro de la formación fluyan a superficie desde el subsuelo o sean inyectados dentro del pozo. La detonación controlada de las cargas, especialmente fabricadas y diseñadas para pozos entubados, produce agujeros (perforados) en el revestimiento (tubería de acero o casing), el cemento y la formación que se encuentra en forma adyacente. La optimización de la producción o de la inyección demanda diseños cuidadosos, planeación previa a los trabajos e implementación en el campo, para obtener disparos conductores limpios que se extiendan más allá del daño de la formación, penetrando en la roca yacimiento no dañado o inalterado.

Lamentablemente, los disparos con explosivos también pulverizan los granos de la roca de la formación generando una zona triturada de baja permeabilidad alrededor de las cavidades de los disparos en la formación, y facilitando la posibilidad la migración de partículas finas. Este proceso también deja algunos detritos residuales de la detonación dentro de los agujeros de los disparos. Debido al rebote elástico de la formación alrededor de los agujeros recién creados genera un daño inducido por los disparos.

Para minimizar el deterioro y las restricciones de la conductividad, causadas por este daño inducido por los disparos, es crucial la obtención de disparos efectivos. Durante 25 años, los procedimientos de terminación estándar utilizaron una diferencia de presión estática relativamente grande, o un bajo balance de presión (underbalance o desbalance negativo), para eliminar o minimizar el daño provocado por los disparos.

La técnica de disparar con un bajo balance de presión es la técnica más difundida de optimización de terminaciones disparadas. Este método establece una presión estática dentro del pozo (antes de los disparos), inferior a la presión de la formación que se va a comunicar. Según la teoría convencional, la oleada inicial (flujo instantáneo) originada por una reducción de la presión de poro en la región vecina del pozo mitiga el daño de la zona triturada y barre la totalidad o parte de los detritos que se encuentran en los agujeros de los disparos.

Recientemente científicos han analizado las presiones transitorias de operaciones de baleo mediante pruebas de laboratorio y descubrieron que el bajo balance estático por sí

solo no garantiza la obtención de disparos limpios. Los resultados indicaron que lo que realmente rige la limpieza de los disparos son las fluctuaciones producidas en la presión del pozo inmediatamente después de la detonación de las cargas - antes ignoradas - y no la diferencia de la presión inicial como se pensaba anteriormente.

Los investigadores aplicaron este mayor conocimiento de las presiones dinámicas de pozo para desarrollar el proceso de balear un pozo bajo las condiciones de bajo balance dinámico. Esta nueva técnica es aplicable a portacargas o escopetas, operados con cable o con líneas de acero, y a sistemas de escopetas bajadas con tubería flexible o con la tubería de producción (TCP por sus siglas en inglés), ya sea en terminaciones de pozos verticales o muy inclinados, incluyendo los pozos horizontales.

Esta técnica utiliza operaciones de disparos diseñadas a la medida de las necesidades, cargas especiales y configuraciones de escopeta diseñadas con un fin específico, para generar un alto nivel de bajo balance dinámico, partiendo de bajo balances o sobre balances de presión. Esta técnica mejora sustancialmente la productividad o la inyectividad del pozo, además mejora la eficiencia operacional de la terminación de pozos.

La eliminación de grandes diferencias de presión estática simplifica los preparativos realizados en el pozo antes de llevar a cabo las operaciones de disparos en condiciones de bajo balance. El control de la oleada inicial limita volúmenes de fluido producidos durante la limpieza de los disparos, lo que a la vez reduce el riesgo de influjo de arena que puede provocar el atascamiento de las escopetas. Además, es probable que no se requieran los pequeños trabajos de acidificación, o los lavados de los disparos, que a menudo son necesarios para remediar el daño que estos producen.

2. BREVE RESEÑA HISTORICA DE BALEO

Sid Mims un hombre dedicado a la industria de petróleo hizo una investigación en 1926 obteniendo la patente 1582184, el cual se trato de un sistema de baleo. En ese entonces la compañía Lane-Wells el 28 diciembre 1932 decidió aplicar esta patente en su primer pozo La Merced 17 en el campo de Montebello-California, esta operación tomo 8 días en completar con un total de 11 corridas para disparar 80 balas a la profundidad de 2665 ft.

Las completaciones originales en hueco entubado utilizo varias herramientas mecánicas para penetrar el casing, para así establecer la comunicación del reservorio al pozo o hueco perforado (wellbore). El uso de herramientas mecánicas en el tiempo fueron muy ineficientes y consumieron tiempo especialmente en zonas con arenas de grandes espesores productores.

Desde 1926 hasta los 1930s, el baleo se realizo con balas. La desventaja obvia fue el alojamiento de la bala o proyectil en el túnel o perforado. El cual restringía el flujo de fluidos del reservorio dentro del hueco perforado (wellbore). Otra desventaja fue la profundidad de penetración lograda por la bala que era muy corta, usualmente unas pocas pulgadas. Estas balas son raramente usadas en estos días.

Las cargas penetrantes o jets de baleo fueron introducidos en la industria del petróleo en los 1940s. El diseño y utilización de estas cargas está basado en el mismo principio como la penetración de un tanque con una bazuca tecnología de la segunda guerra mundial. Hoy, las cargas forman parte del 95% de las completaciones alrededor del mundo. El diseño simple de la carga siendo sus principales componentes que incluye un casco o revestimientos de la carga, el explosivo, y el liner. El liner de la carga puede ser diseñado tanto para crear un chorro el que hace un hueco pequeño en el casing con una penetración profunda en la formación o un hueco amplio en el casing con una penetración mínima en la formación. Estas cargas son clasificadas por su profundidad de penetración (DP) o el tamaño del hoyo (BH).

En los 1950s, sistemas especiales de escopetas para correr a través de la tubería de producción (tubing) fueron desarrollados. Estos sistemas ofrecieron grandes ventajas en comparación con la tecnología de baleo a través del revestimiento (casing) en ese tiempo, el cual requería ser desarrollado mediante una sola condición que es la de sobre balance. El sistema a través de la tubería de producción permitió establecer por primera

vez una condición de bajo balance con el debido control de pozo para el baleo. Esto abrió camino a una mejor limpieza del perforado y mejor productividad. Por los 1970s, la compañía Vann Tool había perfeccionado la técnica del baleo con tubería de producción o que es conocido como TCP por sus siglas en ingles, permitiendo a los operadores llevar longitudes ilimitadas de escopetas y creando de manera segura condiciones de bajo balance de presión (presión hidrostática en el pozo menor que la presión de formación). Los sistemas de escopetas con TCP que usaban detonadores de tipo percusión el cual ofreció muchas más alternativas seguras que el método anterior los cuales usaban detonadores tipo eléctrico.

En los 1990s, la ORYX Energy Company desarrollo el proceso conocido como PerfStim el cual uso las aplicación con TCP donde el pozo es sobre presurizado debajo de la gradiente de fractura antes del evento del baleo para mejorar la productividad del pozo. La Marathon Oil Company mejoro este proceso llamándolo POWR*PERF, mejorándolo a la vez en el año de 1997 con el sistema StimGun, el cual combino escopetas con TCP con un propalante. El TCP es instalado por métodos convencionales y el propalante es ignictado para generar CO₂ a presiones por debajo de la gradiente de fractura el cual crea una fractura pequeña en la región cerca del hueco perforado (wellbore).

El baleo hidráulico fue desarrollado en los 1960s para penetrar el casing por bombeo a alta presión de fluidos con agentes abrasivos (arena) para desgastar el casing, cemento y formación. El baleo hidráulico es muy lento y a veces muy caro. En años más recientes, esta técnica ha ganado algo de interés especialmente como un pre a las fracturas hidráulicas donde solamente unos pocos hoyos son requeridos para hacer el tratamiento.

Este es un cuadro en la evolución en las técnicas de baleo a través de la historia, siendo los pasos más trascendentales los cuales cambiaron la forma de desarrollar la técnica de baleo en la historia y el pensamiento de los ingenieros de completación en la terminación de un pozo:

Year	Perforation Technique
	Mechanical Tools
1930s	Bullet Perforators
1940s	Shaped Charges
1950s	Through-Tubing Guns
1970s	Tubing Conveyed Perforating (TCP)
1990s	Extreme Overbalance (EOB) Perforating
1997	Extreme Overbalance with StimGun™ Assembly
1960s and 1990s	Hydraulic Perforators

3. CONDICIONES DE BALEO

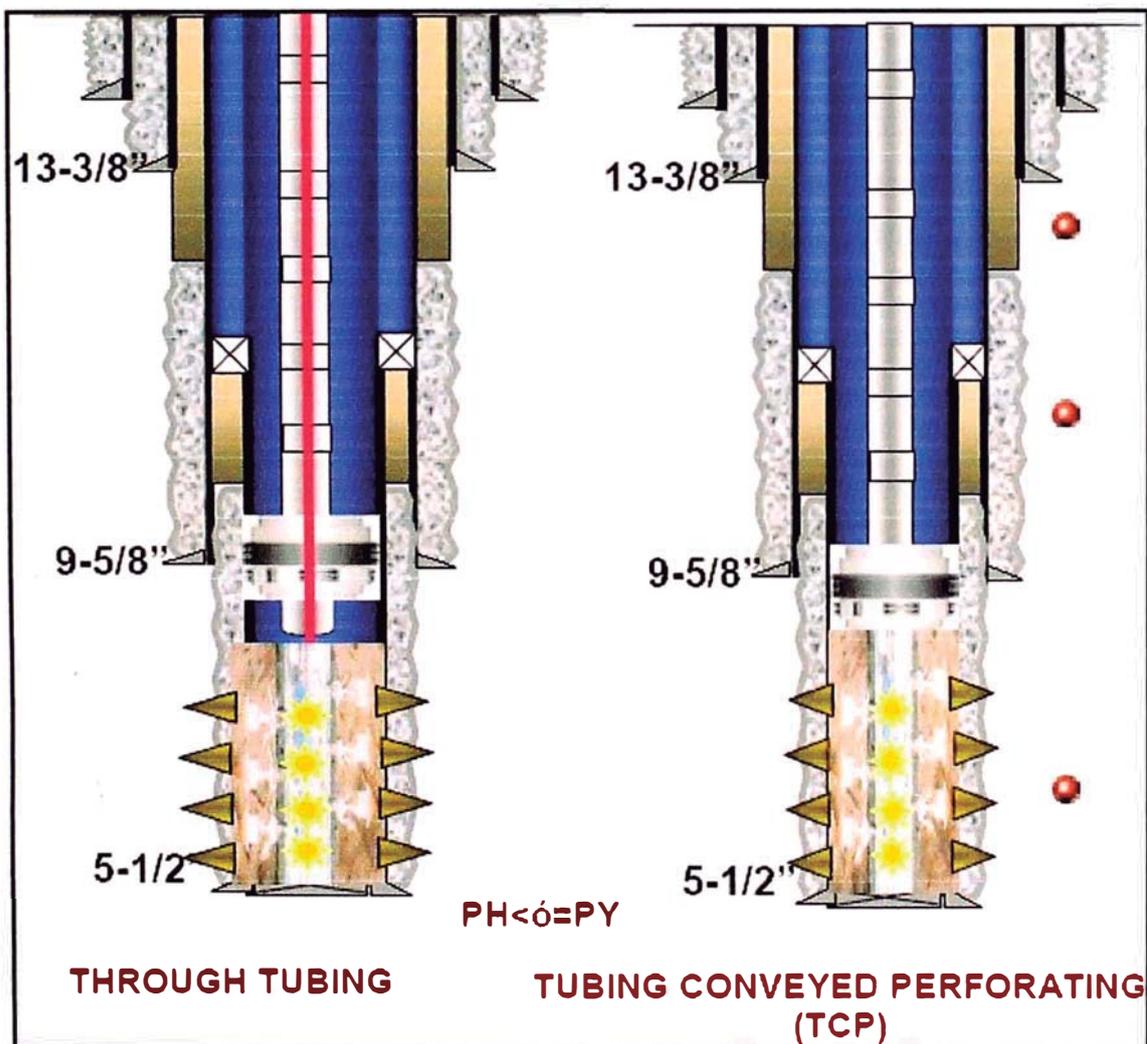
Debido a que el daño por baleo es inevitable, optimizar la limpieza es esencial. El proceso de baleo puede ser realizado bajo dos principales condiciones y estos son: 1) la condición de bajo balance (underbalance) y 2) la condición de sobre balance (overbalance) los cuales son seguidos por un flujo surgente o un lavado de los perforados.

3.1. Bajo Balance (Underbalance)

El baleo en condición de bajo balance fue introducido en los 1950's, este fue limitado a operaciones solo con tubería de producción (tubing) hasta la llegada de la forma de balear con TCP (tubing conveyed perforating) ampliando su uso a todos los tamaños de escopetas.

El baleo bajo condiciones de bajo balance (underbalance perforating), no es más que balear con la presión en el hueco perforado (wellbore) menor que la presión en la formación, como se muestra en la siguiente figura, es generalmente considerado uno de los mejores métodos para crear perforados limpios. Durante los pocos microsegundos que esto toma, una carga se dispara para crear un perforado, una ola de presión enfocada hace un hoyo a través del revestimiento (casing) y dentro de la formación. El material en la trayectoria alrededor de los perforados puede ser compactada. El resultado de esto puede reducir la permeabilidad inicial hasta un 70% o más alrededor de los perforados. Muchos investigadores e ingenieros han notado la presencia de la zona triturada alrededor de los perforados y han reconocido que este explica mucho de los daños que pueden inhibir la producción. Históricamente, los

ácidos fueron comúnmente usados para remover este daño o reducir su efecto en la permeabilidad. En el baleo en bajo balance, la presión diferencial desde la formación al hueco perforado ayuda a remover esta zona triturada de los perforados mas exitosamente que un lavado. Es así que este método generalmente brinda óptimas limpiezas de los perforados y mínimos daños o skins. El nivel de bajo balance seleccionado es el factor clave en la limpieza de los perforados y en el desempeño del pozo.



El nivel mínimo recomendado para un máximo flujo es determinado por las propiedades del reservorio, particularmente permeabilidad, esta se puede determinar

con una relación empírica hecha por el investigador y matemático King et al., la cual sigue la siguiente relación.

$$\log_{10} P_u = 3.46055 - 0.3812 \log_{10} k$$

Donde k = permeabilidad de la formación, md, y P_u = bajo balance de presión, psi.

Un nivel de bajo balance que es demasiado bajo resultaría en una inadecuada limpieza; un nivel que es demasiado alto puede resultar en fallas mecánicas de la formación, movimiento de finos, salida de la sarta del pozo, el colapso del casing, y otros problemas. Los niveles de diferencial de presión suficiente para causar la falla de la formación pueden ser debido a las propiedades mecánicas de la formación. Mientras las pasadas experiencias dadas en un campo es la mejor guía para seleccionar el óptimo bajo balance, reglas generales están disponibles. En la tabla 1 se encuentra los rangos típicos de bajo balance y están relacionados con la permeabilidad de la formación, esta tabla está basada en miles de completaciones alrededor del mundo, presentando así rangos recomendados de bajo balance.

TABLA 1: TYPICAL RANGES OF UNDERBALANCED PRESSURE FOR PERFORATED SYSTEM CLEANUP		
	Liquid	Gas
High permeability, psi (>100 md)	200 to 500	1000 to 2000
Lower permeability, psi (<100 md)	1000 to 2000	2000 to 5000

El bajo balance requerido, es decir la presión adecuada para limpiar los perforados depende de la permeabilidad de la formación y la viscosidad del fluido. Debido a que el baleo en zonas de alta permeabilidad responde mucho más rápidamente que en las de baja permeabilidad. El nivel de bajo balance debe ser seleccionado para asegurar una respuesta óptima.

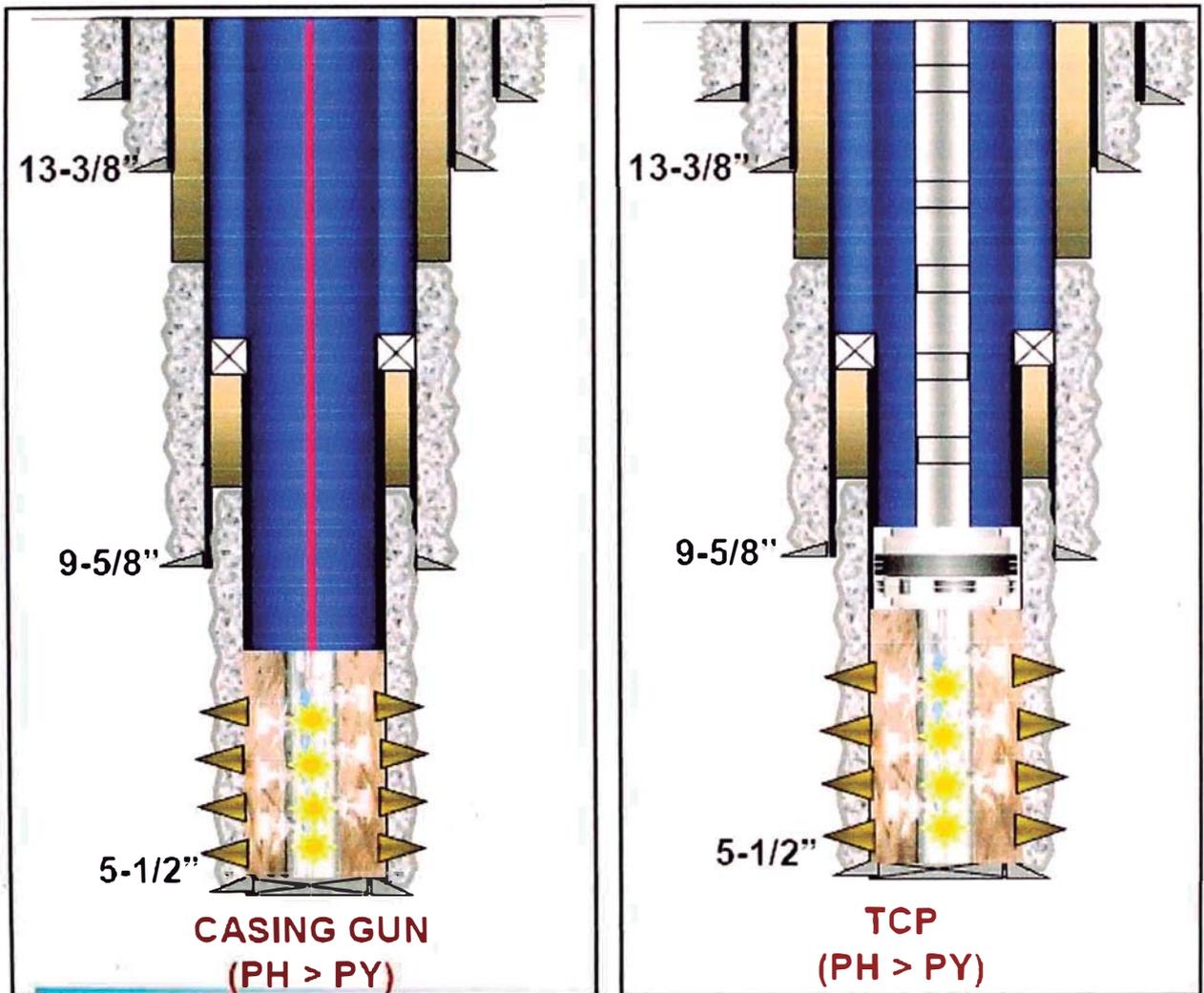
Fluido de Completación:

Los efectos del fluido de completación no son considerados importantes en una completación bajo balanceada ya que el fluido no es permitido invadir los perforados y dañar a la formación.

3.2. Sobre Balance (Overbalance)

Aunque el baleo en bajo balance alienta a la limpieza de los perforados, el baleo en sobre balance es todavía el más usado. Las operaciones de sobre balance también puede obtener buenos resultados cuando los efectos del daño son reducidos con un lavado de los perforados o por acidificación.

El sobre balance, que es mantener la presión en el hueco perforado (wellbore) mayor que la presión de la formación, la cual se muestra en la figura siguiente, y que normalmente este diferencial de presión ($\Delta P = P_h - P_f$) es mantenido a un nivel tal, que brinde seguridad del pozo (well control) o mantenga la presión del hueco perforado. Además hay que tener en cuenta que un nivel bajo de sobre balance minimiza el grado de invasión dentro de la formación.



Fluido de Completación:

Limpieza, compatibilidad, bajo contenido de sólidos en los fluidos de completación son esenciales para una efectiva operación de baleo en sobre balance. Disparar en lodo usualmente resulta en perforados taponados. La limpieza de esos perforados es difícil y la probabilidad de una gran densidad de disparos es remota. Aun cuando fluidos limpios son usados, cuidado se debe tener para no permitir la contaminación con sólidos que pueden causar un significativo decrecimiento en la productividad.

Resultados Comparativos

Los resultados de campo indican que, aun con cuidadosa atención a la selección de los fluidos de completación y un flujo surgente, el baleo en sobre balance obtiene mucho menor productividades que los de bajo balance. Sin embargo, ha habido **excepciones** a esta regla general. Ocasionando preguntas relacionadas a estas excepciones y a la vez investigaciones a que se debe este fenómeno, de encontrar mejores resultados en pozos baleados bajo la condición de sobre balance que bajo balance. Esto ha generado investigaciones recientes y que han demostrado este fenómeno, la cual ha generado un nuevo concepto en el baleo o punzonamiento de pozos y el cual es objeto de este tema de tesis. Este nuevo concepto es conocido como bajo balance dinámico (Dynamic Underbalance o DUB).

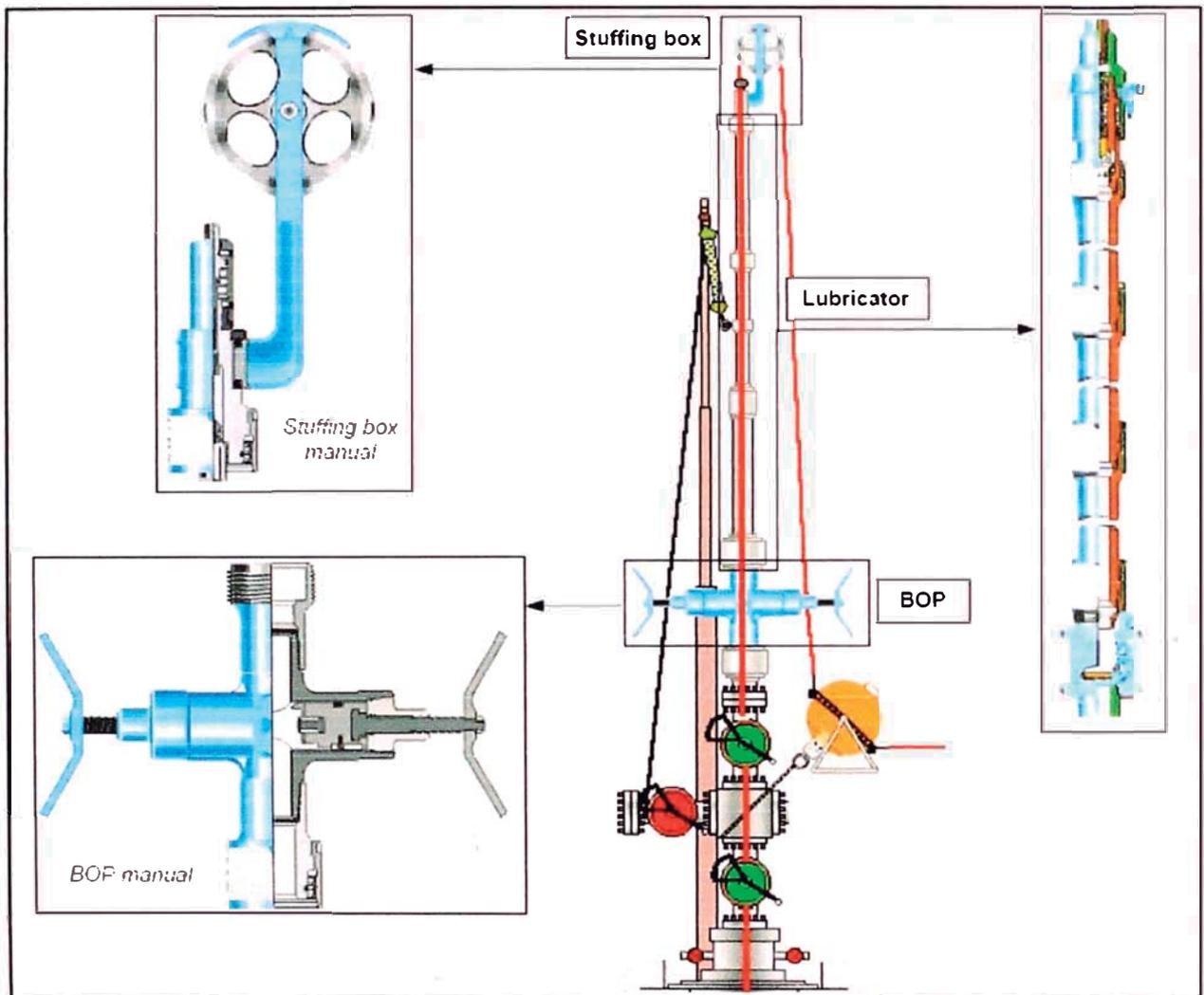
4. COMPONENTES DEL SISTEMA DE BALEO

Los componentes principales en una operación de baleo son básicamente 3: 1) el equipo de control de presión en superficie, 2) el cable y 3) la escopeta. Estos componentes nos van a permitir efectuar en campo la operación de baleo, y las cuales se detallan a continuación.

4.1. Equipo de Control de Presión de Superficie

Las consideraciones para la seguridad del pozo requieren el uso del equipo de control de presión en la cabeza del pozo como una rutina para toda operación de baleo.

La figura siguiente muestra un típico conjunto de control de presión para operaciones con cable (wireline). Desde el tope hasta la parte inferior del conjunto, el sistema consiste de 3 básicos componentes: (1) la cabeza de empaque (stuffing box o packoff) un montaje de dispositivos que actúa hidráulicamente para sellar el cable, (2) el lubricador (riser) la cual aloja toda la sarta de baleo, y (3) el preventor de reventones o BOP capaz del sellado alrededor del cable. Tenemos equipos de 5000, 10000, 15000 y 20000 psi de presión en cabeza.



4.1.1. La Cabeza de Empaque (Stuffing Box o Packoff)

La principal función de la cabeza de empaque (stuffing box o packoff) es asegurar el sellado hidráulico sobre el cable, aun cuando el cable este en movimiento (cable en subida o en bajada en el pozo) y también así previniendo la fuga de fluidos del pozo mientras la sarta de baleo esta en movimiento en del pozo.

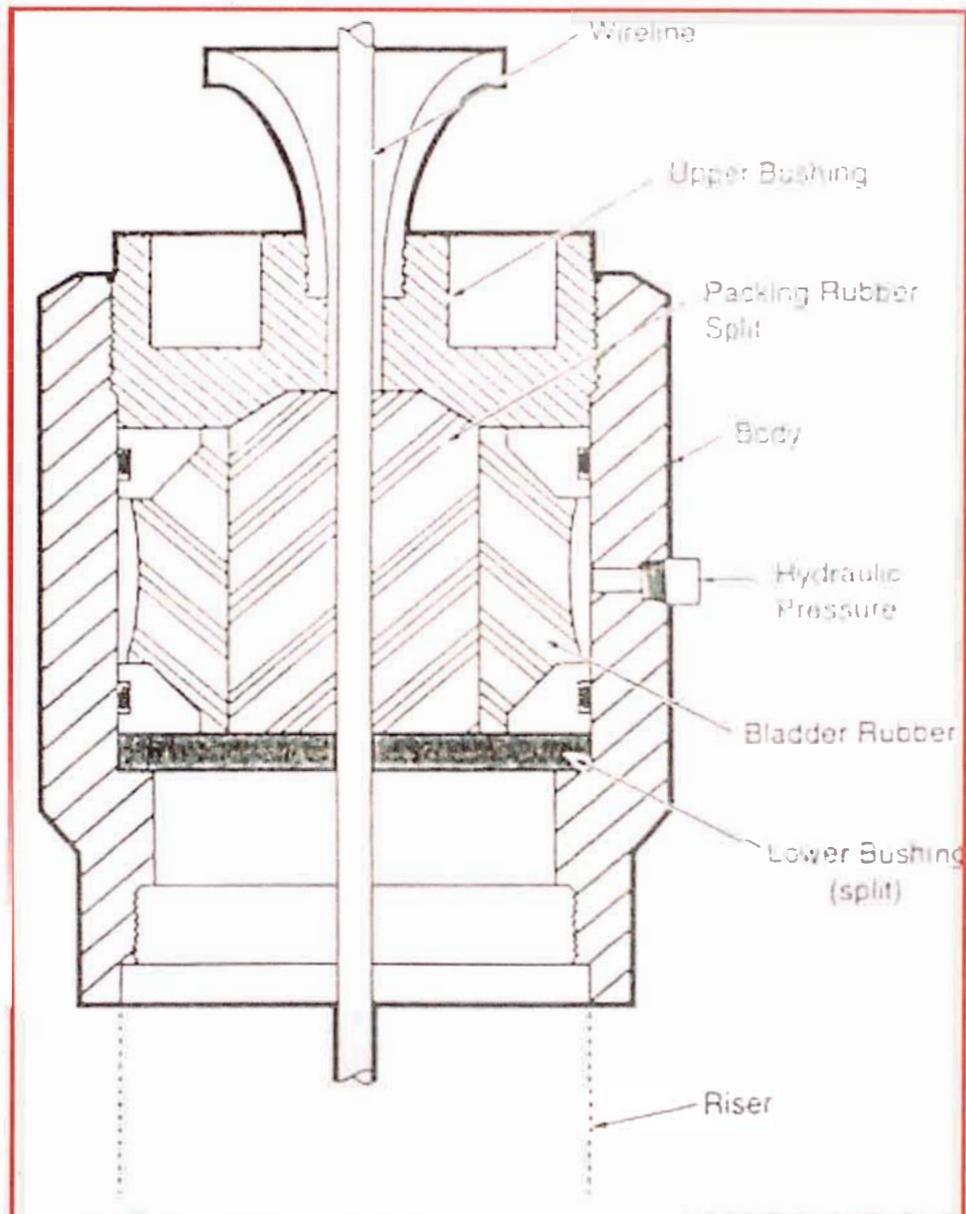


Fig. 4.8—Typical hydraulically actuated packoff (courtesy Hydrolex).

4.1.2. El Lubricador (Riser)

Compuesta de varias secciones de tubos con hilos especiales, para un rápido enrosque. Permite el descenso y recuperación de la sarta de baleo. Las

suficientes secciones pueden ser conectadas en serie, para cubrir el total de la sarta más 2 o 3 pies para maniobras internas.

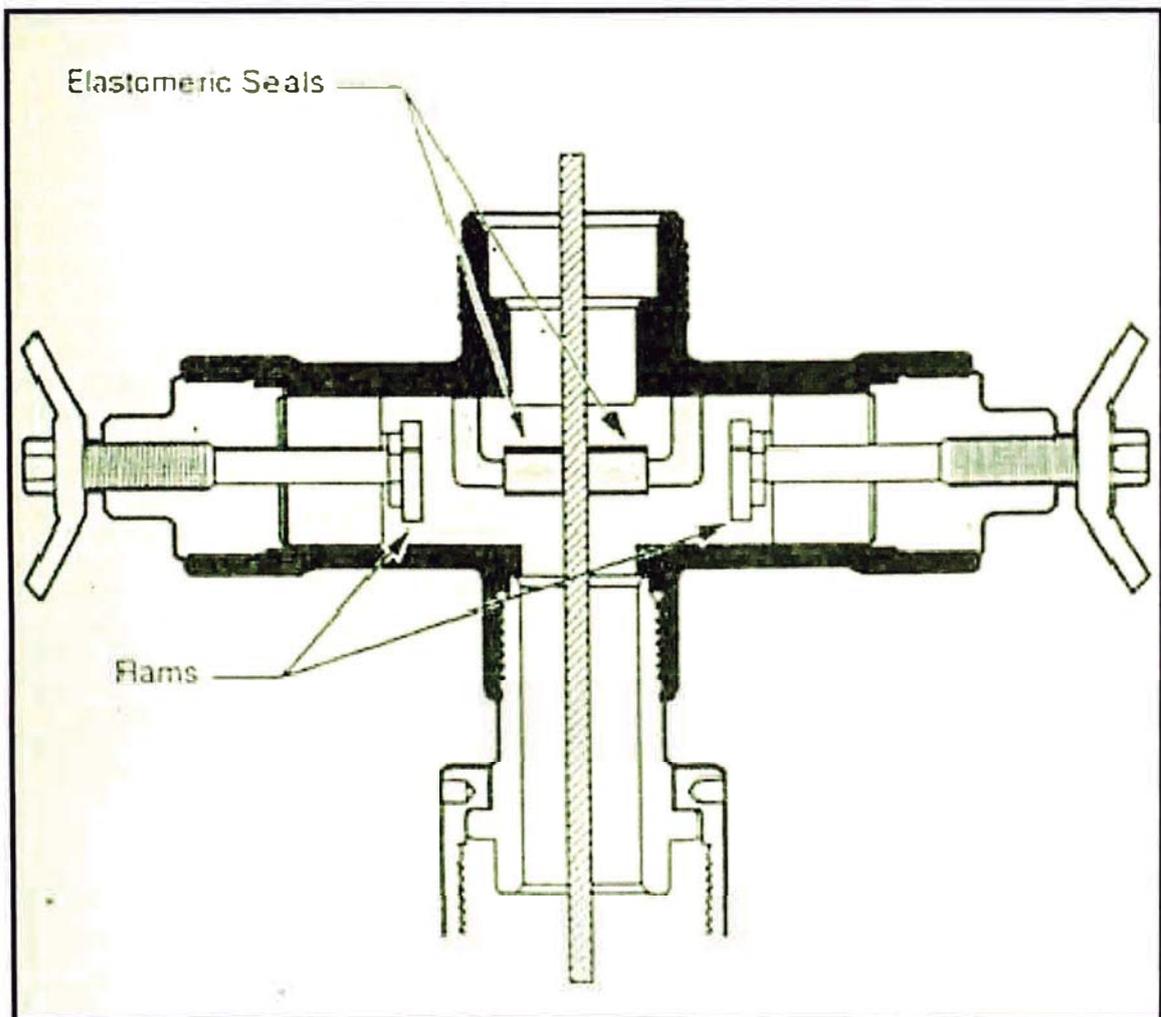
Los lubricadores son simplemente una serie de tubos conectados con el propósito de proporcionar un espacio para que la herramienta pueda ser contenida bajo presión. La longitud total de los lubricadores durante el ensamblaje del equipo, depende de la longitud de la sarta de herramientas necesaria para el trabajo; de igual manera el diámetro interno de los lubricadores, depende de la herramienta de mayor diámetro de la sarta. Todos los lubricadores vienen con uniones rápidas para alta presión; estas uniones pueden estar enroscadas al tubo o ser parte integral del cuerpo del lubricador.



4.1.3. El BOP (Blow Out Preventer)

El nombre de BOP viene del nombre en inglés Blow Out Preventer, y se refiere básicamente a un dispositivo colocado en los taladros de perforación para controlar emergencias en un pozo cuando este no se puede controlar con el fluido de perforación. Es de este nombre, BOP, de donde la válvula de cable o wireline deriva su nombre, aunque su función no sea precisamente la misma. La BOP de

cable o wireline está diseñada para controlar la presión del pozo y sellar alrededor del cable, es utilizada primordialmente cuando un cable debe ser reparado bajo presión, o cuando no se puede obtener nuevamente el control del sello en la cabeza de inyección de grasa. Los elementos de sello son dos, una cara de caucho en los brazos de metal, los cuales tienen una forma para adaptarse al tamaño específico del cable y otro conforma de herradura que hace sello sobre la superficie interna del BOP.

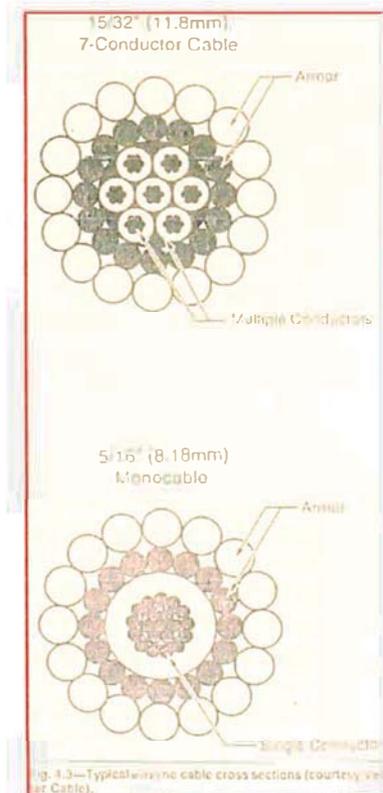


4.2. El Cable (Wireline)

Es un cable especial de acero que en la parte central lleva conductores eléctricos. Los cables (wireline) están disponibles en diferentes diámetros para operaciones con cualquier tamaño de escopeta. El cable provee la suspensión de la escopeta en el pozo, la comunicación con los diferentes dispositivos y el suministro de corriente eléctrica para la iniciación de la detonación del sistema de la escopeta.

4.2.1. Construcción del Cable

En los cables de acero especiales (wireline) modernos generalmente participan dos capas de acero que sirven como blindaje y que están alrededor de una parte central. La parte central contiene un conductor simple (monocable) o muchos conductores (multicable). La sarta de conductores son individualmente y colectivamente aislados y pueden ser envueltos con un sello para minimizar la migración de gas y fluidos a través de los espacios huecos o vacíos entre los conductores. Las dos capas de blindaje alrededor de los conductores sirve con un doble propósito el cual es el de proveer la capacidad de peso y transporte además de proteger los conductores del daño o deterioro.



4.2.2. Selección del Cable

Los factores que influyen en la selección de los cables para las operaciones de baleo son el esfuerzo de tensión, diámetro del cable, materiales del cable (tanto el conductor como el blindaje), y las posibles aplicaciones que se le hagan al cable. El esfuerzo de tensión es la principal consideración en la selección del cable para operaciones de baleo. La tensión del cable en la superficie (es la suma del peso flotante de la sarta de baleo y el cable en el pozo) la cual nunca debería exceder el 65% del esfuerzo de ruptura del cable. El diámetro del cable es también una importante consideración en operaciones donde la presión de superficie es conocida durante la introducción o levantamiento de la sarta del pozo.

Escopetas más largas y pesadas necesitaran usar cables de mayor diámetro, el cual, en movimiento, requerirá unidades más grandes de superficie, cilindros o carretes (drums) con cables más largos y adecuados motores para levantar conjuntos pesados del pozo a velocidades de hasta 20,000 ft/hr. Las figuras a continuación muestran unidades típicas de tierra y mar adentro (offshore) de levantamiento de sargas pesadas de baleo.

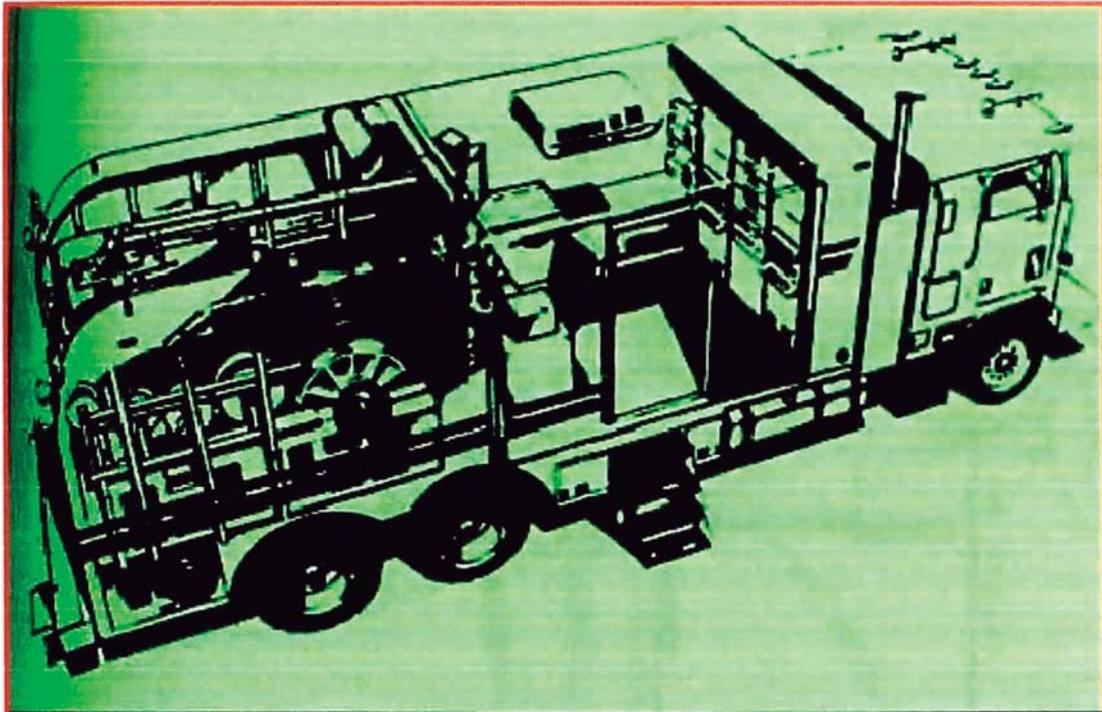


Fig. 4.5—Typical land unit (courtesy Halliburton Logging Services).

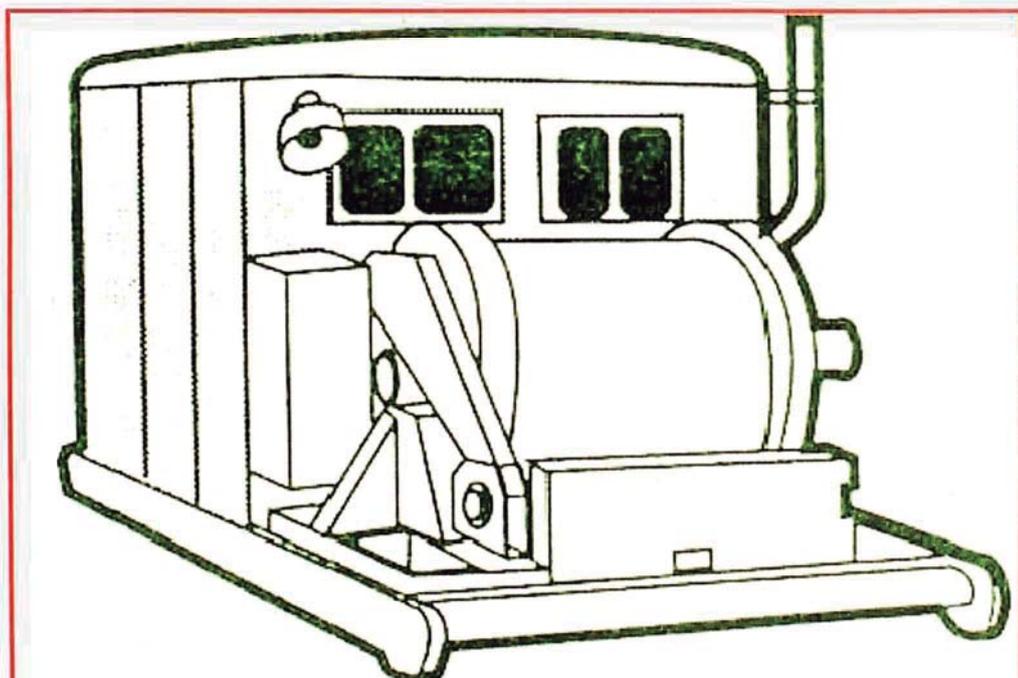
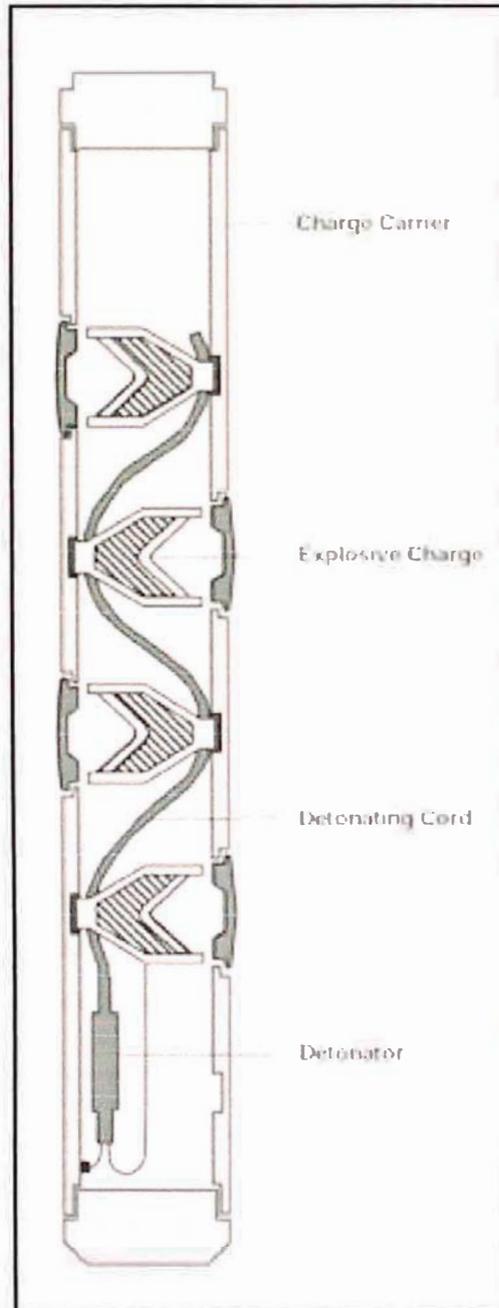


Fig. 4.6—Typical offshore unit (courtesy Schlumberger).

El ambiente del pozo dictamina la selección del material del cable. Altas condiciones de presiones y temperaturas en el pozo hacen que uno requiera cables con alta resistencia a la temperatura para aislar los conductores eléctricos. La presencia de altas concentraciones de H₂S puede requerir cables con especial blindaje que son impermeables al ataque del H₂S.

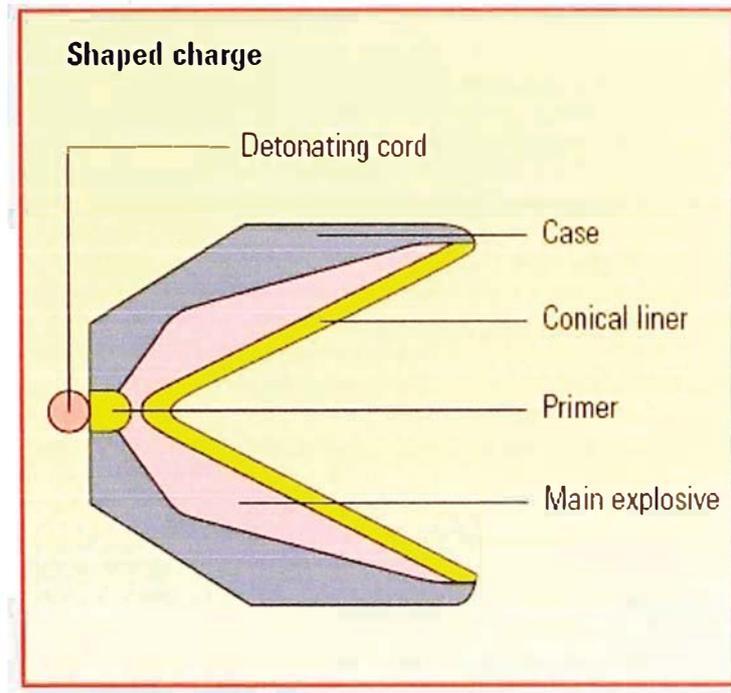
4.3. La Escopeta (Perforating Gun)

Las escopetas son los instrumentos o dispositivos usados para balear pozos. Una escopeta típica o común es como la que se muestra en la figura, este consiste básicamente de un conjunto de cargas explosivas (Shaped Charge), el portador de cargas (Charge Carrier), el cordón detonante, y el detonador. Las cargas son colocadas en el portador de cargas y son conectadas al cordón detonante. El detonador es unido al final del cordón detonante como se muestra en la figura. Un localizador de collares (Casing Collar Locator) es conectado al tope de la escopeta y es usado para determinar las profundidades una vez que la escopeta esta en el pozo o hueco perforado (wellbore).



4.3.1. Las Cargas Explosivas (Shaped Charges)

El más importante componente de la escopeta es la carga explosiva, como se muestra en la figura la carga está compuesta por 4 componentes: el casco o revestimiento de la carga (Charge Case), el forro del cono (Liner), el explosivo base (Main Explosive), y el iniciador (Primer).



El Casco

Guarda o contiene los componentes de la carga. Diseñado para resistir temperaturas y presiones altas. Los materiales usados para el casco pueden ser el acero, aluminio o la cerámica.

Las cargas que son corridas con los portadores de cargas reusables son parcialmente cubiertas por una capa de caucho, esto nos sirve para que cuando la carga detone, esta chaqueta proteja el interior de los portadores de cargas contra el impacto de los fragmentos del casco y así sirviéndonos para incrementar la vida del portador de cargas. También esta chaqueta nos permite además un más fácil alineamiento o colocación cuando las cargas son posicionadas dentro del transportador.

El Liner

El liner provee la masa necesaria para el chorro (Jet) para penetrar el revestimiento (casing), cemento y formación. La presión ejercida en el liner cuando el explosivo base detona causa que el liner colapse y forme el chorro. La

forma del liner y su espesor y composición influyen grandemente en la profundidad, diámetro y efectividad del baleo.

El liner es usualmente cónico o parabólico en forma. La forma cónica es usada en cargas de penetración profunda que produce largos perforados o huecos, y la forma parabólica es usada en cargas de gran diámetro de hoyo para producir grandes diámetros en los perforados.

Los liners son usualmente hechos de cobre o una combinación de cobre con otro metal. La alta densidad de cobre es importante para proveer al chorro la masa necesaria para penetrar el objetivo.

El Explosivo Base

Este provee la energía necesaria para producir el chorro. La masa, distribución, y velocidad de detonación del explosivo base afecta grandemente a la función y desempeño o de la carga.

Los explosivos como el RDX, HMX, HNS, y el PYX son usados como explosivos bases. La apropiada cantidad de explosivos es medida dentro del casco de la carga. Las formas del liner y del interior del casco determina la distribución del explosivo. El tipo de explosivo y cantidad determinan su velocidad de detonación.

La cantidad de explosivo base está entre rangos que van desde 2 gramos en cargas colocadas en portadores de cargas de diámetro pequeño usadas a través de la tubería de producción (tubing), hasta más de 30 gramos usadas en cargas colocadas en portadores de carga usadas en aplicaciones de casing.

El Iniciador

El iniciador (Primer o Booster), está compuesto por una cantidad pequeña de explosivos que son más sensitivos que los explosivos bases. El iniciador es algunas veces referido a como una carga transfiere el choque de calor desde el Cordón detonante al explosivo base. Las ondas de choque en el cordón detonante genera una onda de choque en el iniciador el cual detona al explosivo base.

Es el encargado de encender el explosivo base. Aunque el explosivo del iniciador deflagra rápidamente, este no detona, de hecho una acción detonante sería totalmente indeseable, puesto que tendería a esparcir y no que a encender al explosivo base.

El iniciador usualmente consiste de aproximadamente 1 gramo del mismo tipo de explosivo como del explosivo base., es decir si el explosivo base es un RDX, entonces el iniciador usualmente será un RDX también.

El iniciador está ubicado en un pequeño receptáculo dentro de la carga. La ranura por donde pasa el cordón detonante se encuentra exactamente detrás del receptáculo que contiene al iniciador. De esta forma el iniciador recibe la mayor cantidad de calor liberada por la combustión de la mecha o cordón detonante.

4.3.2. El Portador de Cargas (Charge Carrier)

Las escopetas, y los portadores de carga, están agrupadas dentro de las 2 mayores categorías basadas en el campo de aplicación: Los de revestimiento (casing guns), y los de tubería de producción (through tubing guns). Los de revestimiento son usados para balear en diámetros grandes. Estos son todos recuperables pero solo algunos reusables. En cambio los de tubería de producción son usados para balear en diámetros pequeños, debido a que se pueda encontrar restricciones en el revestimiento que impedirían el tránsito de escopetas de gran diámetro, usando uno de pequeño diámetro o más conocidos como de tubing o tubería de producción. Algunos portadores de tubing son recuperables pero ninguno se puede volver a usar.

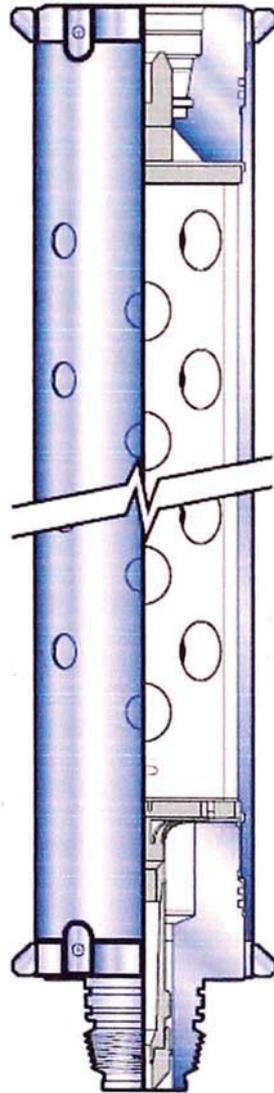
Portadores de Casing (Casing Guns)

Un portador de revestimiento está compuesto de una pared tubular gruesa en el cual las cargas son colocadas y posicionadas. Las partes finales del portador son selladas para que así las cargas estén protegidas de los fluidos y presiones en el pozo. Los diámetros relativamente grandes de un portador de revestimiento brindan una flexibilidad en el mayor uso de tamaños de cargas que pueden ser usados.

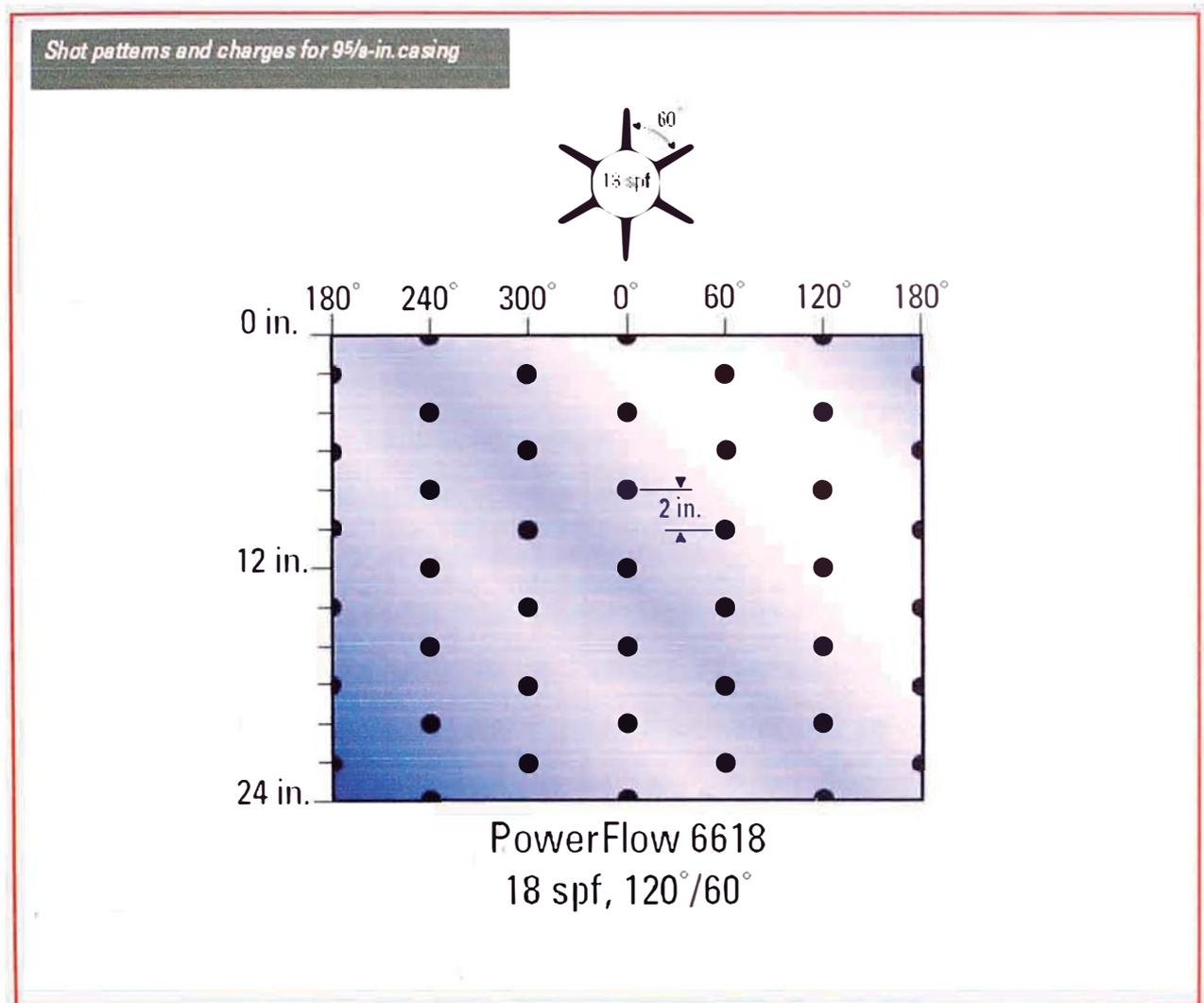
Este tipo de portador provee una gran variedad de diseños de baleo, los portadores de revestimiento están disponibles en un amplio rango de faseamientos y densidades de disparo. El faseamiento se refiere a la medida angular entre dos cargas adyacentes si ellos fueran proyectados a una línea en un plano perpendicular. Faseamientos comunes son de 0°, 60°, 90°, 120° y 180°. La escopeta en la figura siguiente es un diseño en espiral y tiene 60° de faseamiento. La densidad de disparos se refiere al número de disparos localizados en un intervalo vertical de un pie. La densidad de disparos están entre 1 a 21 disparos por pie (spf).

La mayor limitación en los portadores de revestimiento está relacionada con el tamaño, diámetro, y rigidez del transportador, ya que esto puede ocasionar en algunos casos la incapacidad de pasar a través de pequeñas restricciones que se puedan encontrar en la configuración del pozo.

65/8-in. HSD gun, 18 spf, 120°/60° phasing



Patented Charge Packing



Portadores de Tubería de Producción (Through-Tubing Guns)

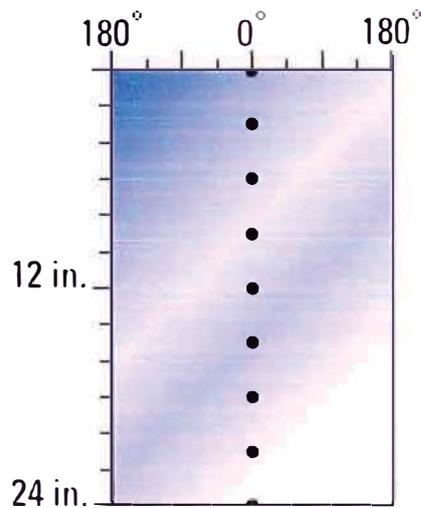
Los portadores de tubería de producción o tubing son esencialmente una versión de diámetro más pequeño que los de casing y además este tiene muchas de las mismas ventajas.

Sin embargo, debido a los diámetros pequeños de este, solo se puede usar cargas pequeñas, reduciéndose de esta forma la profundidad de penetración y diámetro de los perforados en comparación con las cargas de los portadores de casing. El faseamiento está generalmente limitado a 0° y 180°; y la densidad de disparo varía usualmente desde 1 a 6 disparos por pie (spf).

2 1/8-in. Ceramita Gun



Shot patterns in 5 1/2-in. casing



4 SPF, 0° Phasing

4.3.3. El Cordón Detonante

Se entiende por cordón detonante o conocida también en el campo como “mecha”, al conducto que transporta el tren de fuego de un lugar a otro; en este caso lo transporta desde el detonador a las cargas. El cordón detonante más conocido es el Primacord. Esta consta de un tubo de tejidos trenzados y encerrados, que generalmente son de seda o nylon. Los rango típicos de diámetros del cordón detonante van desde 0.1 a 0.25 pulgadas.

El relleno que lo constituye, por lo general son los explosivos como el PETN o el RDX. A todo este conjunto se lo impermeabiliza por medio de una envoltura exterior de plástico o caucho tratado. La velocidad de detonación del explosivo está entre 5500 y 10000 m/s. Siendo la velocidad de detonación para el Primacord a base de RDX de aproximadamente 8500 m/s.

La unidad utilizada para describir los explosivos que se utilizan en la confección del cordón detonante y detonadores es el GRANO, cuya equivalencia con otras unidades es:

1 GRANO = 0.064799 Gramos.

1 GRANO = 0.25 Quilates.

7000 GRANOS = 16 Onzas.

Como el explosivo del cordón detónate no está colocado a presión, su combustión no llega a ser detónate, sino solo este llega a deflagrar, ya que para encender el iniciador se necesita calor y no presión. La velocidad de detonación debe ser forzosamente elevada, porque ha de tenerse en cuenta que la combustión del cordón detonante se lleva a cabo dentro del pozo y sumergida en el liquido, de no ser así, el liquido impediría la combustión apagando el cordón detonante.

4.3.4. El Detonador

Existen dos tipos de detonadores: el detonador eléctrico el cual funciona con corriente eléctrica y el detonador a percusión el cual funciona a golpe. Ambos se utilizan en el baleo va a depender de las características del trabajo y del tipo de escopeta que se utilice para seleccionar un detonador; solo se mencionara el eléctrico, pero básicamente tienen el mismo proceso de detonación.

El detonador está conectado eléctricamente con la fuente generadora de la superficie. Se entiende por detonador al dispositivo que se emplea para encender un cordón detonante o hacer estallar un explosivo.

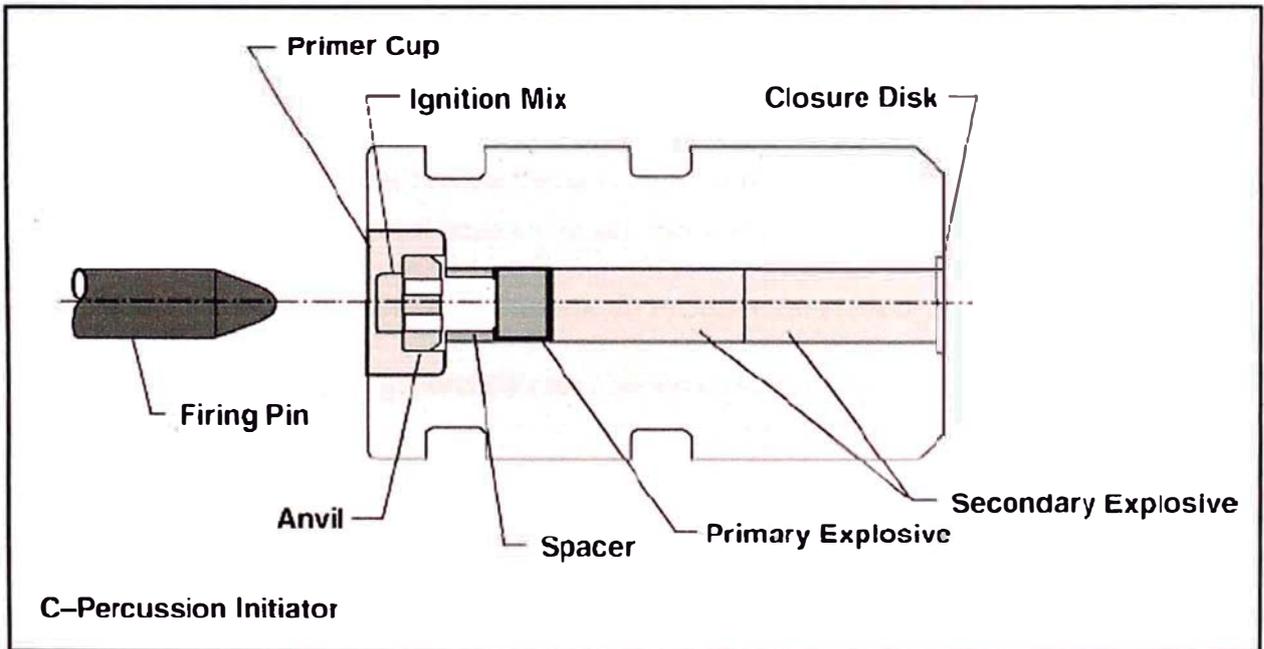
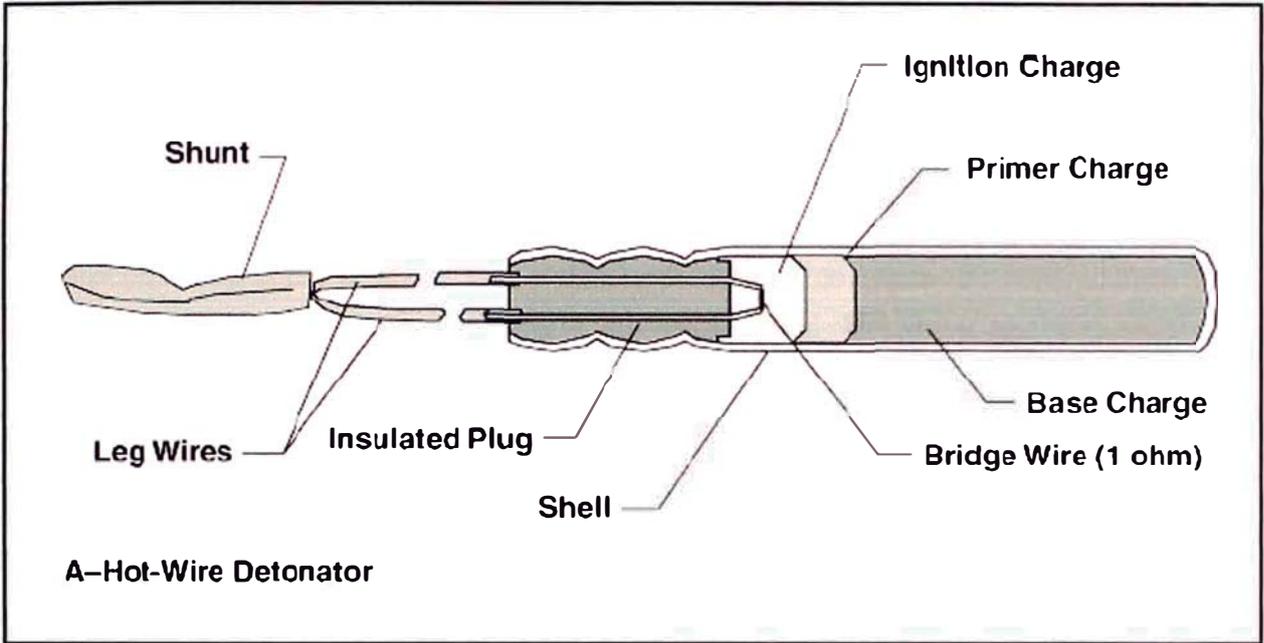
Los detonadores utilizan una serie de explosivos primarios muy sensibles, y que detonan muy fácilmente cuando se ven expuestos a temperaturas relativamente bajas. Los explosivos de uso más común para estos fines son: fulminato de mercurio y nitruro de plomo. Además el detonador contiene una pequeña carga también de explosivos secundarios como el RDX o PETN, que sirven para transmitir y multiplicar la energía liberada. La onda de choque generada por el explosivo secundario es la que enciende al cordón detonante.

Un envío eléctrico enciende la mezcla de ignición, que no estalla, sino que deflagra, pues solo debe generar calor. Este calor hace estallar el explosivo primario y este a la vez detona al secundario.

El detonador está constituido por un cuerpo de bronce, donde va encerrado el sistema explosivo. En la parte de salida de los cables de conexión, tiene un tapón de goma que impide la entrada de líquido. En el extremo opuesto se conecta el cordón detonante, que al ser introducida queda en contacto con el explosivo secundario. Esta unión también debe protegerse de la filtración de líquidos.

La unión cordón detonante – detonador se efectúa por medio de un maguito de aluminio o goma llamado “booster”. En algunos modelos el booster es de goma, y viene apartado formando otra unidad. En otros el booster es de aluminio y forma un solo conjunto con el detonador. Los booster de aluminio tienen un sistema que consta de un explosivo primario y uno secundario. La onda de choque generada por el explosivo secundario del detonador enciende el primario del booster y este enciende al secundario. En estos booster el explosivo primario es el nitrato de plomo, el secundario es exógeno.

Los rangos en los detonadores van aproximadamente de 1 a 3 pulgadas de largo y alrededor de 0.25 a 0.30 pulgadas de diámetro.



5. METODOS DE BALEO

En la actualidad existen tres métodos para cañonear o balear un pozo: (1) mediante cable o más conocido como wireline, (2) mediante tubería de producción o más conocido como TCP, y (3) mediante tubería enrollable o más conocida como coiled tubing. La aplicación de estos métodos van a depender del tipo de escopeta, configuración del pozo, los factores económicos que involucran cada método y por supuesto las propiedades y características del reservorio.

5.1. Cable (Wireline Conveyed Perforating)

Las escopetas corridas con este método utilizan un cable eléctrico especial, cuyas características del cable ya lo mencionamos anteriormente, a continuación detallaremos como es que se realiza una operación de baleo con este método.

Este método incluye dos tipos de operaciones: 1) baleo a través del revestimiento y 2) baleo a través de la tubería de producción (tubing). Las condiciones de pozo para un baleo a través de la tubería de producción es de bajo balance (la presión hidrostática en el pozo es menor que la presión de la formación), en cambio cuando se balea a través del revestimiento la condición de pozo es de sobre balance (la presión hidrostática en el pozo es mayor que la presión de la formación).

5.1.1. Baleo a través de la Tubería de Producción (Through Tubing Gun)

El procedimiento general de este método es lo siguiente:

1. Se baja la tubería de producción con empaque.
2. Se crea un diferencial de presión negativo ($P_{\text{hidrostática}} < P_{\text{formación}}$) posteriormente se baja la escopeta con el cable, utilizando generalmente cañones no recuperables o parcialmente recuperables.
3. Finalmente, se procede a hacer la operación de disparo a la formación.

Este método de baleo permite obtener una buena limpieza de las perforaciones, debió al diferencial de presión negativa.

Desventajas:

- Los intervalos de arena a ser baleado están limitados al tamaño de la escopeta, siendo esta menor o igual a 30 pies de longitud.
- El disparo es afectado, debido a la diferencia de diámetros entre la escopeta y el revestimiento a ser baleado.

5.1.2. Baleo a través de la Tubería de Revestimiento (Casing Gun)

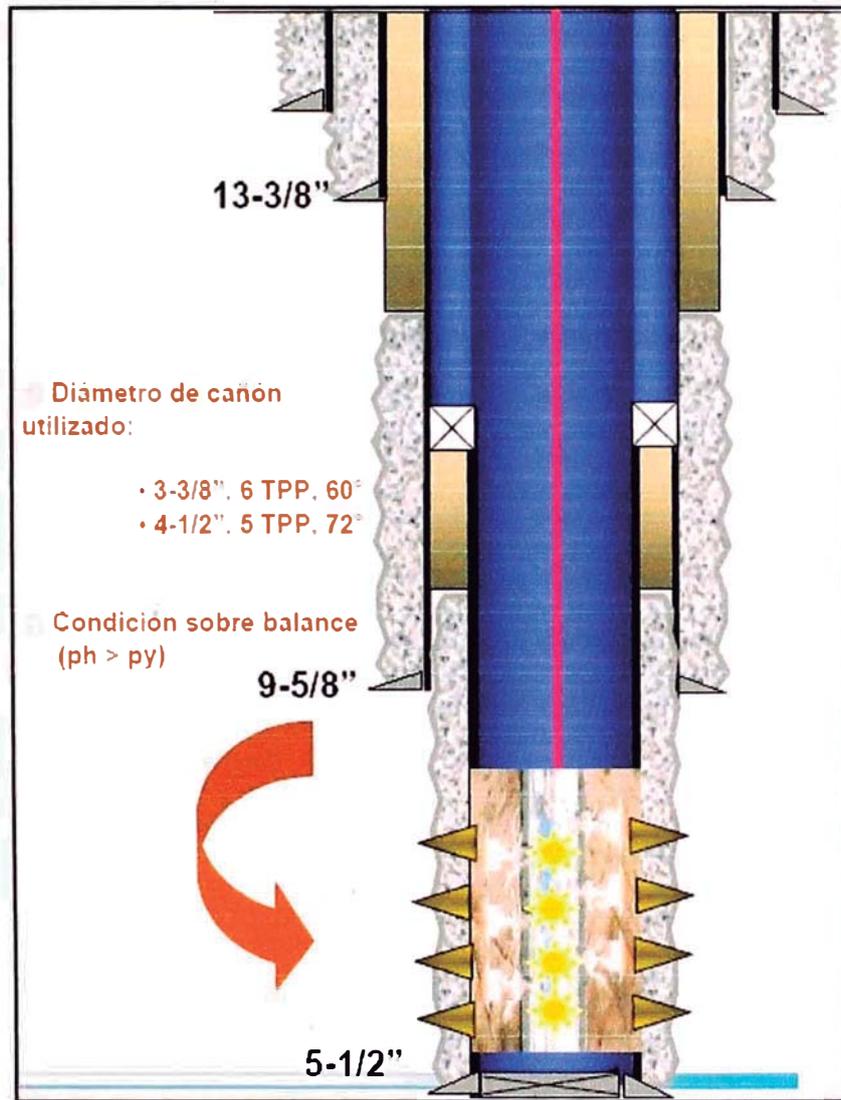
El procedimiento general de este método es lo siguiente:

1. Primero, se crea un diferencial de presión positivo (P hidrostática $> P$ formación), para controlar el pozo contra una posible surgencia.
2. Se baja la escopeta a través del revestidor (casing), utilizando el equipo de cable.
3. Finalmente, se procede a hacer la operación de disparo a la formación.

Este método es más eficiente que el anterior, cuando se usan en operaciones de fracturamiento o de inyección, ya que para estas operaciones se requiere un buen control del tamaño de los perforados, lo cual se logra usualmente utilizando este método con escopetas de casing, los cuales ya mencionamos anteriormente.

Ventajas:

- Se cuenta con escopetas diseñadas de acuerdo al diámetro interno (ID) del revestimiento, con penetraciones de hasta 49 pulgadas y con densidades de disparo entre 4 y 27 disparos por pie (spf).
- Se cuenta con la capacidad de balear intervalos de arena de hasta 60 pies.
- Se logra un menor tiempo de las operaciones de baleo.



Desventajas:

- Se corre el riesgo de una posible arremetida o surgencia, debido a que no se cuenta con tubería en el pozo.
- Que solo se realiza esta operación cuando se tiene el pozo controlado o lleno de fluido.
- Se obtiene perforados con residuos debido a la operación de baleo, reduciendo así la capacidad de producción de la formación.
- Se logra dañar a la formación debido a la incompatibilidad de fluidos existentes, tanto en la formación como en el pozo.

Aplicaciones de Baleo con Cable

En la aplicación de baleo con cable encontramos una amplia gama de aplicaciones.

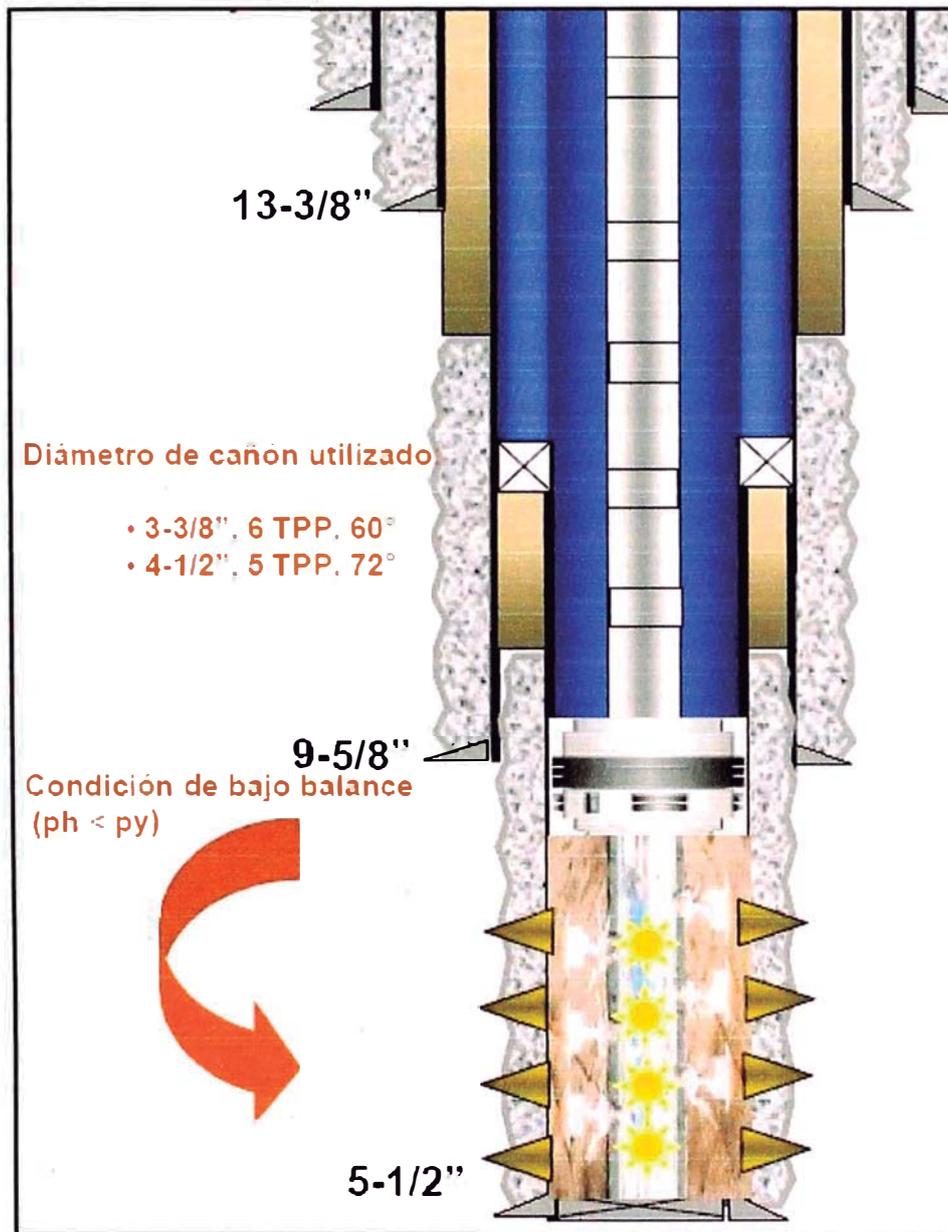
- Cuando el total de costos de terminación y el tiempo del equipo son las principales consideraciones.
- En terminaciones de zonas relativamente pequeñas.
- Para operaciones de alta temperatura donde el tiempo de exposición de los explosivos a la temperatura debería ser minimizada.
- Cuando el pozo podría ser baleado con sobre balance (overbalance).
- En operaciones para remediar donde el pozo puede ser re-baleado sin ser este matado.
- Cuando el tamaño del hoyo en el revestimiento (casing) es una consideración primordial.

5.2. Tubería de Producción (Tubing Conveyed Perforating)

Las escopetas corridas con este método utilizan la tubería de producción, cuyas escopetas son transportadas en el extremo inferior de la tubería de producción con una empaquetadura la cual debe ser asentada antes de iniciar la operación de baleo.

Con este método se logran perforados limpios, profundos y simétricos, ya que este método permite utilizar escopetas de mayor diámetro, cargas de alta penetración, alta densidad de disparo, se puede balear grandes longitudes de intervalos de arena en una sola corrida, y todo esto con la ayuda de un diferencial negativo de presión (P hidrostática $< P$ formación), se logra obtener una operación de baleo óptima, la cual se va a ver reflejada en un menor daño, ocasionados por las operaciones de baleo.

También se obtiene una mayor seguridad en el pozo, cuando se emplea este método, esto se debe a que cuando bajamos la escopeta con la tubería de producción se utiliza el equipo de control de presiones en el cabezal del pozo, el cual se va a encontrar instalado todo el tiempo de la operación de baleo. Brindando de esta forma una mayor seguridad al personal.

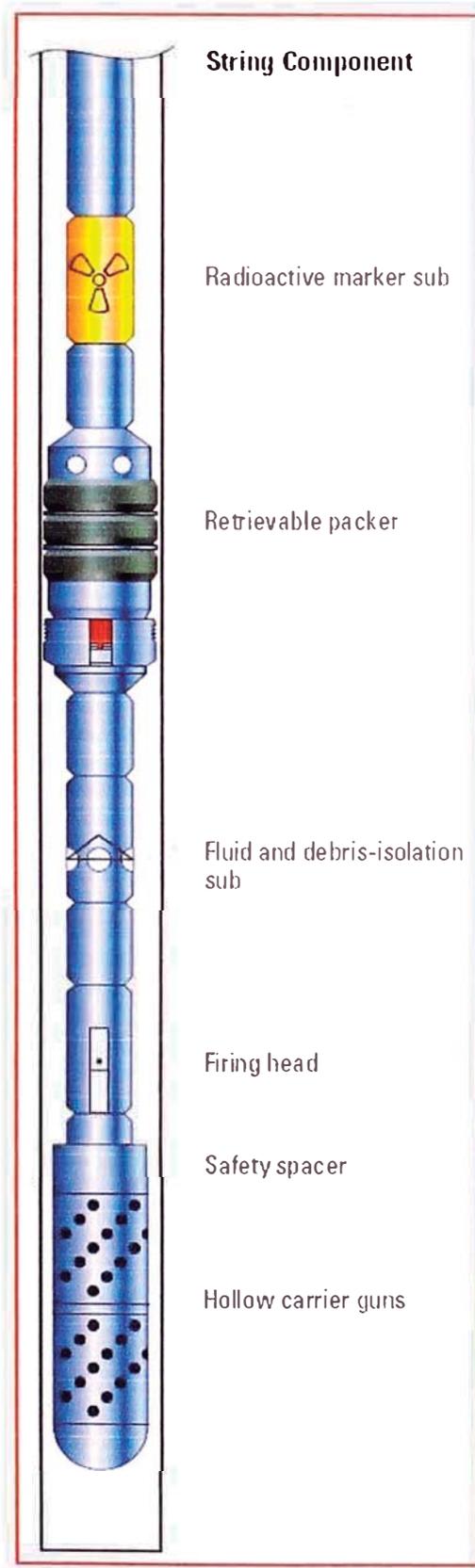


Configuración Básica de un TCP

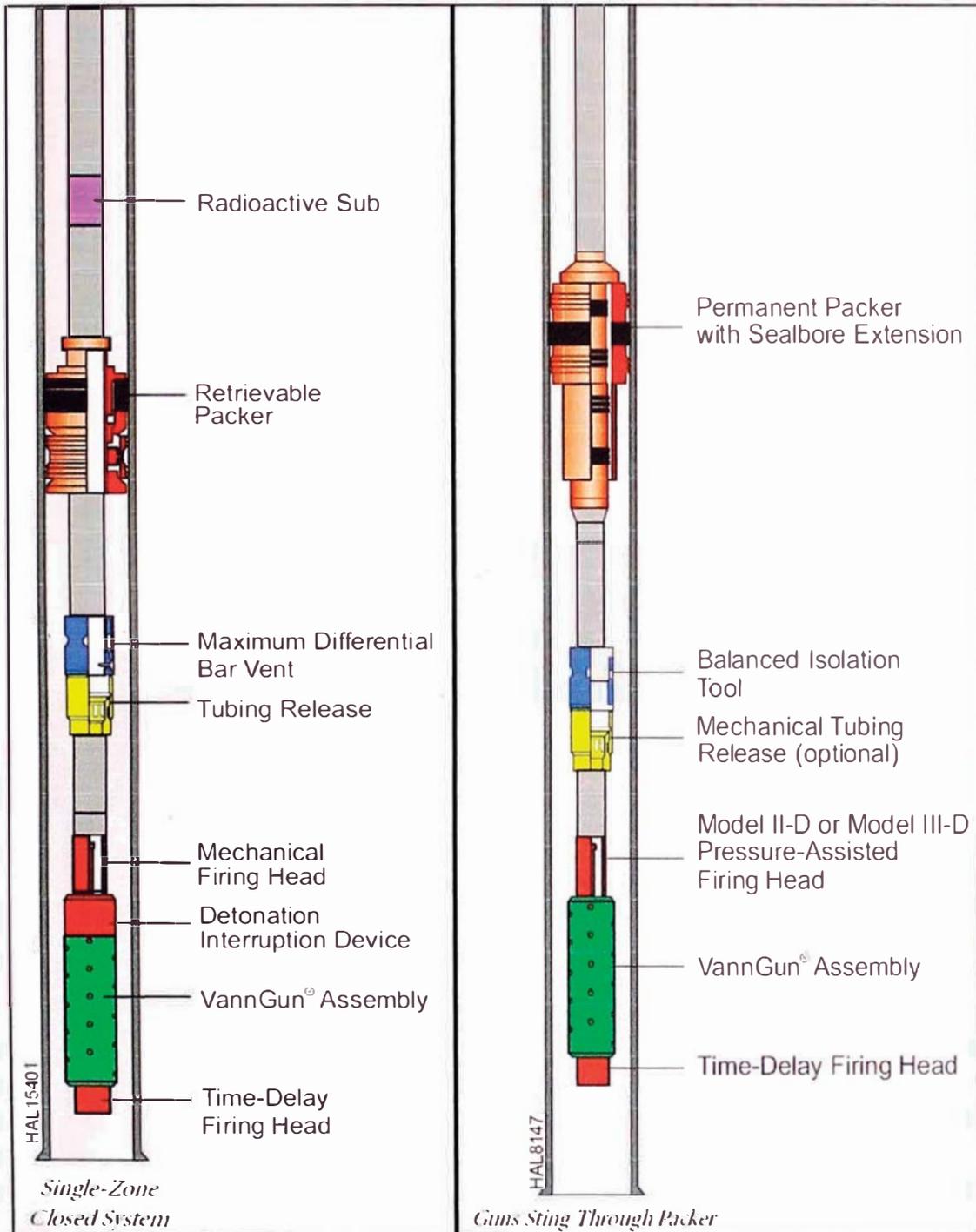
En el baleo con TCP, la sarta de baleo, junto con los espaciadores y accesorios seleccionados, es corrido dentro del pozo al final de una prueba o sarta de completación. La sarta es posicionada con las escopetas en frente de las zonas de interés, el equipo de superficie en cabeza es instalado, una presión bajo balance es establecida y las escopetas son disparadas. El resultado es el baleo inmediato de las intervalos seleccionados. El baleo con TCP provee también la oportunidad de

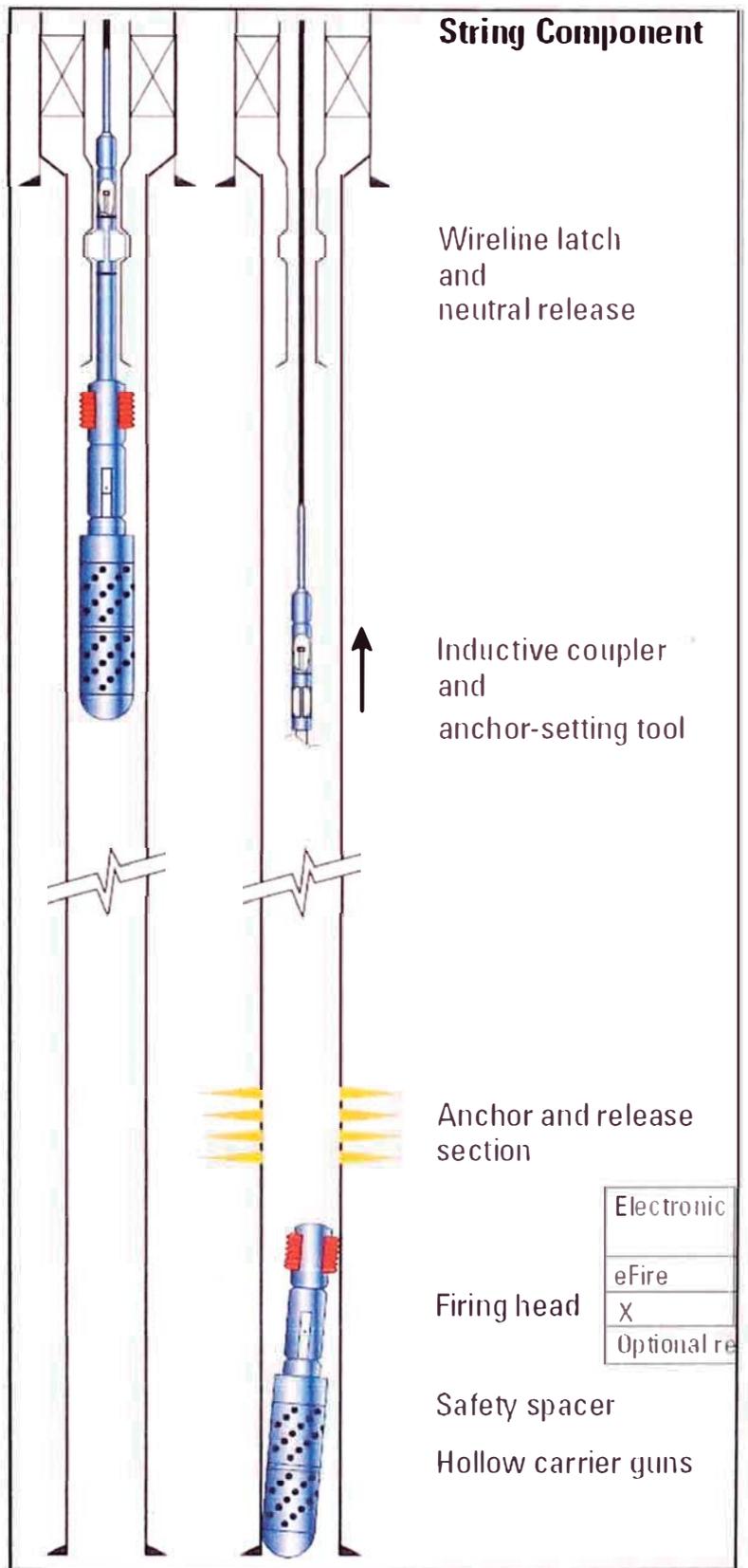
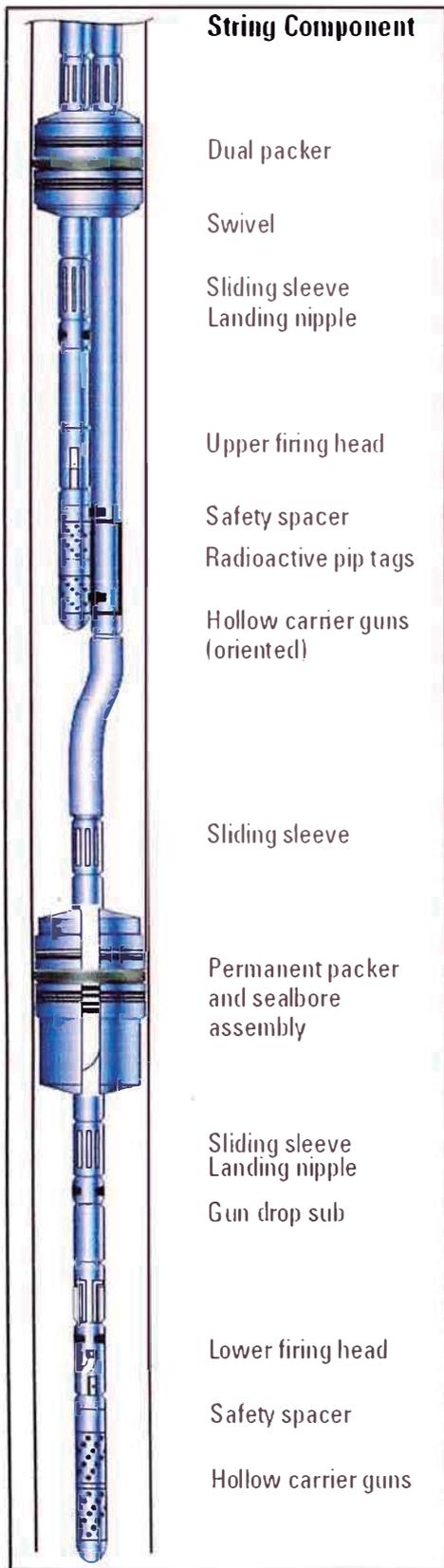
desarrollar una prueba de flujo inmediatamente después del baleo por medio de la incorporación de equipos de prueba de flujo en la sarta.

La figura siguiente muestra esquemáticamente una configuración típica de un baleo con TCP, el cual consiste de cañones, una cabeza de disparo, una escopeta de alivio o de liberación (gun release sub), un portador (ported sub), un packer y una referencia de profundidad (depth reference sub). Para una operación típica con una profundidad de disparo de 10000ft, 6 a 8 horas son requeridas para completar la secuencia de baleo del pozo. Esto incluye el tiempo para instalar la sarta, correr la sarta a la profundidad deseada y posicionarla, instalar el equipo de superficie de cabeza, establecer la presión del pozo planeada en la profundidad de la escopeta, disparar las cargas, y recuperar la sarta.



Las configuraciones de la sarta para baleo con TCP son muchas y variadas, y pueden ser adaptados a cualquier clase de requerimientos de la completación. Los siguientes gráficos son esquemas de configuraciones representativas de baleo con TCP que abarcan la mayoría de completaciones o terminaciones.





Función de Control-Accesorios:

La selección de componentes o accesorios para el uso en el ensamblaje del TCP depende de los requerimientos específicos de la terminación o completación. Como podemos ver en las configuraciones anteriores, muestran una considerable flexibilidad en términos de poder escoger el equipo o método a desarrollar para la función deseada. Aparte de los sistemas de disparo, los cuales son discutidos después, los accesorios pueden incluir los siguientes.

1. Marcador radiactivo que puede ser usado para el control de la profundidad.
2. El circulador de detritos, el cual permite que los detritos sean circulados hacia superficie.
3. El aislamiento del fluido en el tubing o la presión bajo balanceada puede ser controlada con un simple bar actuando como un lente o disco o bar, procedimientos del slickline, o presiones hidráulicas.
4. El sistema de alivio de la escopeta es para eliminar las presiones que se puedan generar en las operaciones de la misma.
5. Los absorbedores que están para amortiguar los movimientos generados por los disparos o por una prueba de flujo.
6. Otros accesorios incluidos son los igualizadores de presión, los orientadores, el sistema de detección de los disparos y en algunos casos el hardware de completación dual.

Ventajas:

- Garantiza la operación de baleo en una condición de pozo de bajo balance, lo cual produce perforados limpios.
- Brinda seguridad durante las operaciones de baleo, debido a que se tiene tubería dentro del pozo y también se tiene instalado un BOP en el cabezal del pozo.
- Capacidad de balear largos intervalos de arenas en una sola corrida.

- Se tienen escopetas de acuerdo al diámetro interno (ID) del revestimiento con penetraciones de hasta 49 pulgadas y con densidades de disparos que van desde 4 hasta 27 disparos por pie (spf).
- Permite el baleo de zonas con alta inclinación, debido a que se utiliza tubería para transportar la escopeta.

Desventajas:

- Se corre el riesgo de controlar el pozo después de haber efectuado el baleo a la zona de interés.
- Involucra un mayor tiempo de ejecución en la operación de baleo, en comparación con otros métodos.

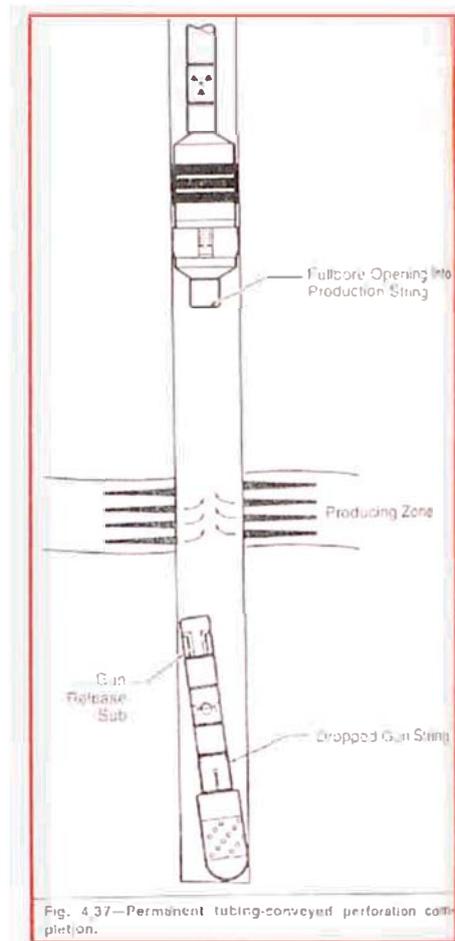
Aplicaciones de Baleo con TCP

Las completaciones con TCP caen dentro de 2 tipos básicos, el temporal (representando la mayoría, desde un 70 a 90% de las completaciones con TCP) y el permanente.

En una completación temporal, las escopetas son corridas dentro del pozo en una sarta de trabajo o workstring. Después de que las escopetas son disparadas y algún tiempo es permitido para la limpieza de los perforados y una posible prueba de flujo (well testing), el pozo es matado con el fluido menos dañino o más compatible para la formación (todos los fluidos crean al menos algún grado de daño a la permeabilidad), y el TCP es sacado o removido. Los procedimientos de completación son luego implementados (acidificación, fracturamiento, empaquetamiento con grava, etc.).

En las completaciones permanentes con TCP, las escopetas son corridas dentro del pozo en el final de la sarta de producción. Las escopetas se quedan en el pozo después de las operaciones de baleo o pueden ser soltadas o puestas en el hueco de rata si se desea matar el pozo después del baleo no es requerido.

Las escopetas modernas con instrumentos de alivio dejan un tubular abierto en la sarta de producción, facilitando luego operaciones de cable como registros o trabajos de remediación.



5.3. Tubería Flexible o Enrollable (Coiled-Tubing Conveyed Perforating)

El uso de la tubería flexible para balear, puede proveer una capacidad y flexibilidad adicional para las operaciones de baleo, la cual es mayor que las operaciones convencionales con cable (wireline) y tubería de producción (TCP). Además bajo ciertas condiciones de pozo (presión, temperatura y configuración del pozo), este método ha probado ser más eficiente que los otros métodos.

La rigidez y resistencia de la tubería flexible permite resistir grandes fuerzas de tensión y compresivas. También este método nos brinda la facilidad de operar en pozos muy desviados, intervalos horizontales o cuando se tiene que desplazar en el pozo grandes y pesadas escopetas. Además este método es seguro debido a que se cuenta con un equipo de control de presión la cual permite una operación fácil y segura.

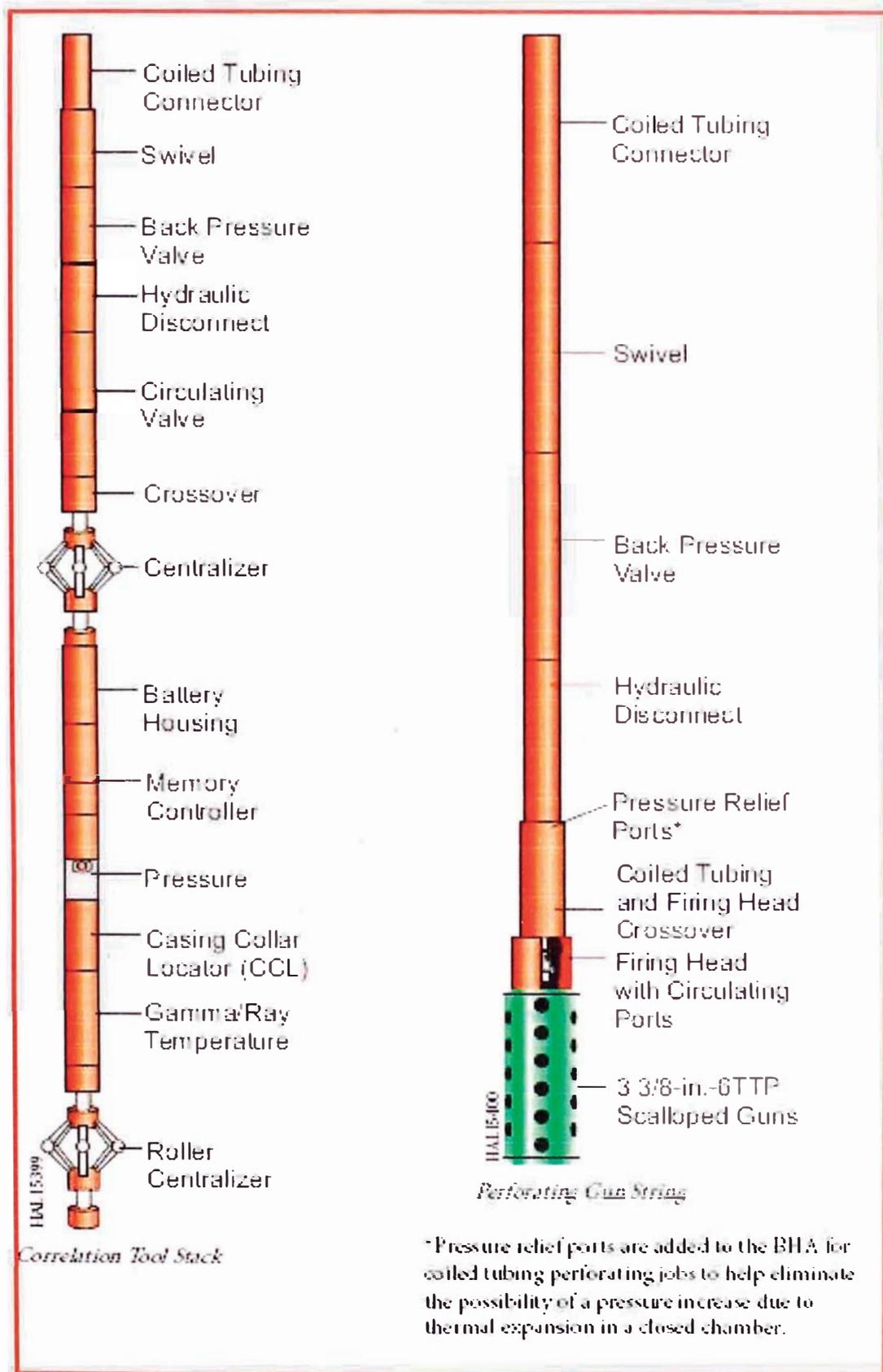
Existe para este método existen dos formas aplicables para llevar a cabo los disparos de las escopetas. El primero utiliza corriente eléctrica mediante un cable instalado en la tubería flexible (electrical firing), y el segundo utiliza una presión hidráulica para detonar la escopeta (pressure firing).

Las escopetas con tubería flexible han sido efectivamente usadas por muchos años en la zona de interés en una variedad de aplicaciones.

Los beneficios que este incluye son corridas mucho más rápidas en tiempos comparados a los métodos convencionales y también las escopetas pueden ser detonadas tanto con wireline o a presiones activadas en las cabezas de disparo.

Aplicaciones de Baleo con Tubería Flexible

- Balear en condiciones de bajo balance la cual ocurre cuando la presión hidrostática es mucho menor que la presión de la formación. Balear bajo estas condiciones permite incrementar el flujo de la formación, el cual ayuda a la limpieza de los perforados y ayuda también a reducir el daño cerca del pozo.
- El baleo de pozos horizontales con tubería flexible puede ser aplicado en porciones horizontales del pozo donde los métodos convencionales de baleo son no prácticos o imposibles en algunos casos.
- La tubería flexible también puede ser usado como tubing de producción después de la completación. Especiales características incluyen como por ejemplo una válvula de alivio automática, la cual permite separar a la tubería flexible de la escopeta antes de que esta sea disparada, evitando dañar a la tubería enrollable. Una escopeta con sistema modular esta también disponible en el cual las escopetas son cargadas en la superficie, desplazando individualmente al fondo y apuntalando en la zona de baleo. Este método ayuda a eliminar alguna restricción en la longitud de la escopeta ocasionada por el lubricador.



6. NUEVO METODO DE BALEO

6.1. Introducción

Hasta hace unos pocos años, los científicos e ingenieros de petróleo creían que la magnitud del bajo balance estático inicial, junto con propiedades específicas del reservorio, controlaban el grado de la remoción del daño en las operaciones de baleo. Sin embargo, la mayor cantidad de datos sugieren o dicen que las presiones en una condición de bajo balance, son requeridas para minimizar o eliminar efectivamente el daño ocasionado por el baleo. Un bajo balance mucho menor que el óptimo puede ocasionar un flujo de rates variables y un diferente grado de remoción del daño.

Las fuerzas dinámicas, (el diferencial de presión y el arrastre de fluido) son las que mitigan el daño a la permeabilidad por erosión y remoción de los granos de la formación fracturada de las paredes del perforado, son mucho más grandes inmediatamente después del baleo. Este es el punto clave de comienzo para el desarrollo de las ecuaciones semi-empíricas para las presiones en bajo balance y daño por baleo, o los skin, de la data histórica que se tiene. Los factores claves son la máxima diferencial de presión en tránsito y el subsecuente arrastre de flujo en forma radial, tanto turbulento o laminar.

Los investigadores tomaron poca atención en exactamente cuanta presión bajo balanceada ocurre inmediatamente después de la creación del túnel o perforado. Eso cambió con la llegada de la medida de la presión con rates extremadamente rápidos. Estas nuevas medidas proveen más detalle, mucha mayor resolución de datos acerca de las variaciones de presiones inmediatamente después del baleo del hueco perforado o pozo (wellbore).

Es así que para producir petróleo y gas, se debe disparar todos los pozos con tubería de revestimiento cementado a lo largo de los intervalos productivos. Este proceso de disparo o baleo conecta las formaciones subterráneas con el pozo permitiendo el influjo de los hidrocarburos o la inyección de fluidos en el mismo.

Los perforados o túneles limpios, son esenciales para maximizar el desempeño de los pozos. Desafortunadamente, los chorros de alta energía producido por la detonación de las cargas explosivas generan daños por ondas de impacto y crean

partículas finas y escombros (detritus) residuales como resultado de la fragmentación y aflojamiento de los granos de formación.

En la década de 1960, los ingenieros reconocieron los beneficios de efectuar los disparos con un bajo balance estático inicial; con una presión de pozo que es inferior a la presión de la formación. Con la introducción y utilización más generalizada de los sistemas TCP en la década de 1970, las operaciones de baleo en condiciones de bajo balance se convirtieron en la técnica más aceptada para prevenir la invasión de fluidos en una formación con posterioridad a los disparos, y para mitigar el daño de la zona triturada alrededor de los túneles de los disparos y remover los escombros de las cavidades de los disparos.

En la década de 1980 y 1990, los trabajos de investigación realizados en torno a las operaciones de baleo se concentraron en la definición de criterios de bajo balance y en la predicción de la diferencia de presión requerida para generar disparos limpios y efectivos. Sobre la base de trabajos experimentales, los investigadores desarrollaron una ecuación de bajo balance mínimo. La aplicación de esta ecuación condujo al desarrollo de la técnica de baleo en las condiciones de bajo balance extremo o EUB por sus siglas en inglés, que aplica diferencias de presión estática, entre dos o cuatro veces superiores a las utilizadas previamente en las operaciones convencionales. La técnica EUB está diseñada para generar una oleada inicial (un influjo de fluido al pozo) desde la formación y limpiar los túneles de los disparos. No obstante esta técnica tiene limitaciones y plantea inquietudes relacionadas con la seguridad de las operaciones con cable. Bajo altas presiones diferenciales, las escopetas operadas con cable, sin anclar, se pueden desplazar, o saltar, hacia la superficie durante los disparos, lo que puede dañar el cable eléctrico o hacer las sartas de herramientas se atasquen.

La disponibilidad de medidores de presión con velocidades de muestreo de datos extremadamente rápidas facilitó el trabajo de investigación, tan necesario en esta área. Estos nuevos medidores de alta resolución pueden registrar variaciones de presión del pozo durante el primer segundo posterior a los disparos. A fines de la década de 1990 y comienzos de la década de 2000, los investigadores en esta área, realizaron pruebas de un solo disparo utilizando medidores de alta resolución.

Estos estudios descubrieron que durante algunas centésimas de segundo después de la detonación de la carga, la presión del pozo oscila. Los resultados de las pruebas indicaron que la limpieza de los disparos no dependía exclusivamente de las condiciones estáticas iniciales del pozo, existentes antes de los disparos, fueran estas de bajo balance, balance o sobre balance.

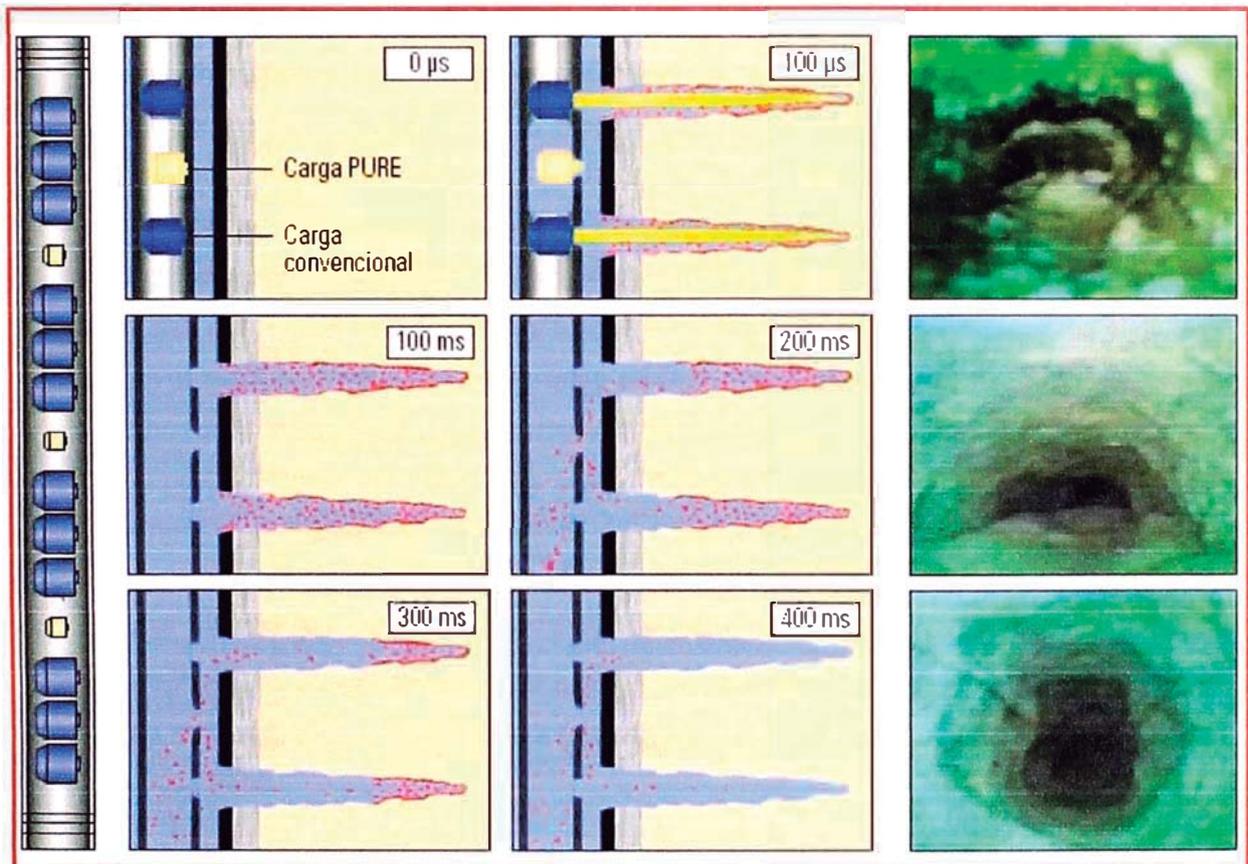
En la mayoría de los caso, tanto las operaciones de baleo convencional en condiciones de bajo balance como en las operaciones de baleo EUB, requieren operaciones con tubería flexible y operaciones de bombeo, con el fin de obtener las condiciones hidrostáticas iniciales mediante el desplazamiento de fluidos. Además se requiere una carrera con cable o con línea de acero para desplazar y recuperar las sargas de pistolas, y extraer el ancla. Para intervalos de terminación largos, estas operaciones combinadas pueden consumir tres o más días. Además, las técnicas de bajo balance y EUB a veces arrojan resultados no esperados e índices de productividad o inyectividad bajos. Por el contrario, las operaciones de disparo con presiones iniciales balanceadas o incluso sobre balanceadas, pueden arrojar resultados sorprendentemente buenos. Hasta hace poco, solo se enfocaban recursos mínimos en la determinación del porque de la gran variación de la efectividad de los disparos en condiciones de bajo balance, o en el grado de la diferencia de presión que se logra efectivamente durante los disparos.

6.2. Bajo Balance Dinámico (Dynamic Underbalance)

Un bajo balance dinámico es un bajo balance obtenido durante aproximadamente los primeros 100 milisegundos después de la iniciación del evento de baleo. Este bajo balance dinámico está en función de: 1) las presiones iniciales del pozo (wellbore) y el reservorio, 2) la escopeta, 3) el diseño de la carga, 4) la geometría del pozo, y 5) la permeabilidad del reservorio. Un bajo balance dinámico puede ser obtenido independientemente de cuándo o no las condiciones iniciales estáticas estén con un bajo balance, sobre balance o balanceado. Para obtener un bajo balance dinámico, el sistema y proceso del baleo es diseñado mediante un software para crear un bajo balance instantáneo durante el baleo. Este bajo balance dinámico puede ser creado inmediatamente después de de la detonación de la carga (menos de 0.1 segundo) para poder efectivamente remover la zona triturada. Por tanto, la sarga de baleo debe ser diseñada según las condiciones. El flujo surgente dentro del pozo (wellbore) y

dentro de la escopeta remueven las partículas de la zona triturada de las cavidades o perforados que se genero en el baleo.

En la figura siguiente se muestra una explicación más detallada de cómo se realiza y que es lo que sucede en un baleo bajo condiciones de bajo balance dinámico, para obtener perforados limpios, y como consecuencia la obtención de mejores resultados que los métodos convencionales.



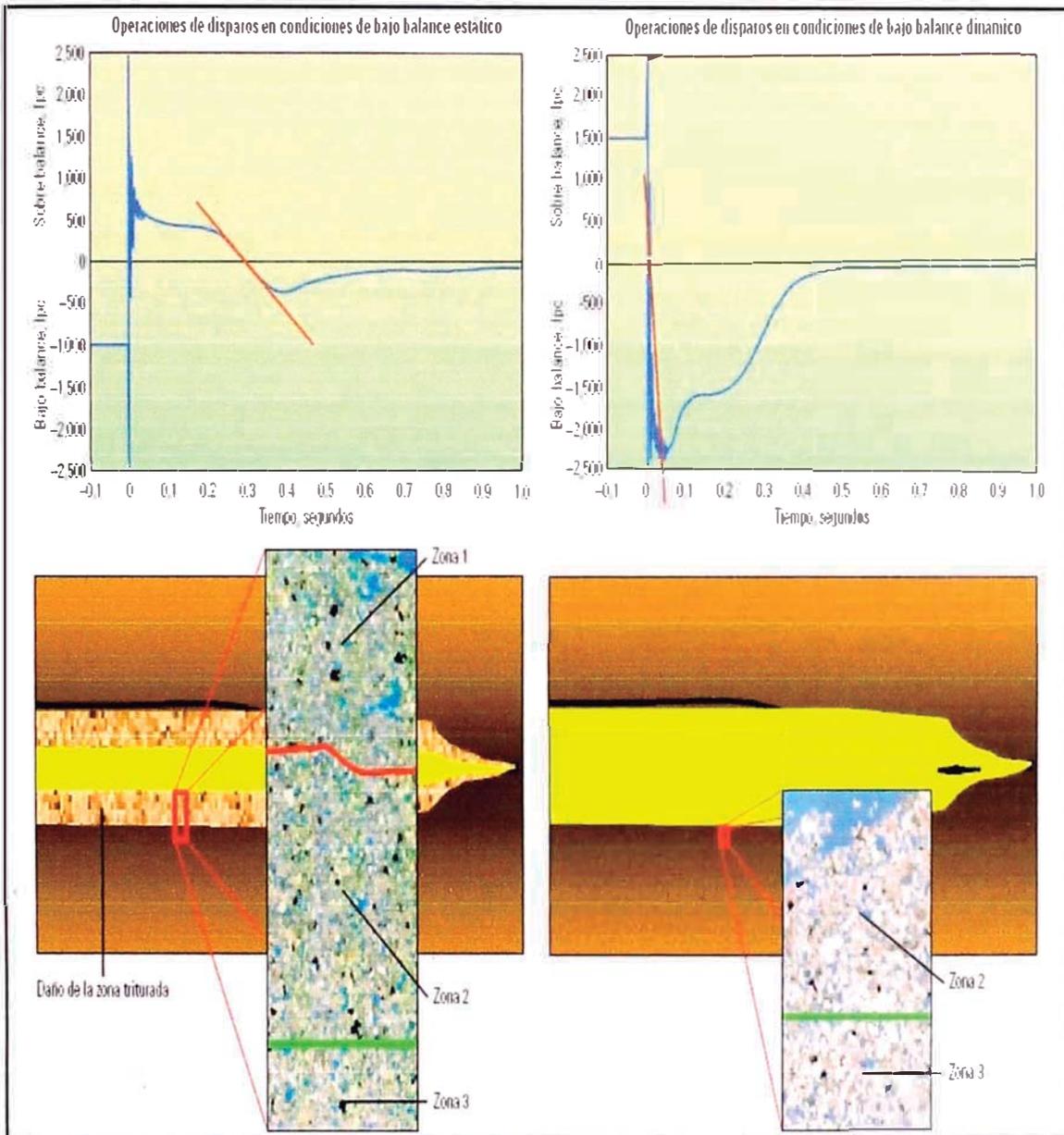
Para la obtención de un bajo balance dinámico óptimo y eliminación del daño producido por los disparos, se utiliza además de las cargas convencionales (color azul), cámaras y cargas especiales (color amarillo), intercaladas a lo largo de la escopeta (extremo izquierdo). Las cargas especiales no penetran en la tubería de revestimiento del pozo sino que la función de estas cargas especiales es abrir orificios extras en los portadores de carga convencional o en las cámaras especiales adicionales, con el objetivo de maximizar la diferencia de presión en

tránsito y optimizar la limpieza de los disparos (centro a la izquierda y centro a la derecha).

La secuencia del proceso del baleo medida en milisegundos es la siguiente:

Inmediatamente después de la detonación de las cargas, los chorros de alta velocidad de los disparos generan túneles en la formación en el lapso de tiempo entre 0 a $100\mu\text{s}$ como se muestra en la figura anterior. Lo que hace este diseño es manipular las condiciones de pozo y los parámetros de las escopetas para crear instantáneamente un bajo balance óptimo a lo largo de un intervalo de disparo, lo cual se genera entre 100 a 200 ms. Luego, tanto la duración de la oleada inicial como el efecto por tracción recaen sobre la zona triturada alrededor de los túneles de los disparos eliminando el daño inducido y los escombros residuales, este proceso se genera aproximadamente entre 300 a 400ms. Es así que la aplicación rápida de un alto diferencial de presión es la clave de las operaciones de disparos bajo este nuevo método. En el extremo derecho de la figura se muestra también los núcleos de laboratorios disparados, y examinados bajo condiciones de esfuerzo hidráulico con una probeta de video a color, las cuales muestran un disparo relleno con material de formación pulverizado y rodeados de granos de cuarzo fragmentados (extremo superior derecho); un disparo sin fragmentación, pero con material pulverizado en la parte inferior del túnel (centro, a la derecha); y un túnel limpio (extremo inferior derecho). Las cuales muestran la efectividad de la limpieza y geometría del perforado bajo este método, lo cual no se logra con los métodos convencionales en la mayoría de los casos.

La diferencia de presión máxima generada en un pozo durante los primeros 100 milisegundos (ms) posteriores a los disparos, incidió directamente en las variaciones producidas en la productividad de los núcleos disparados durante las pruebas de flujo posteriores a las operaciones de baleo. Las presiones más altas en condiciones de bajo balance dinámico generaron mejores eficiencia de flujo en núcleos disparados. Las evaluaciones de laboratorio posteriores confirmaron que la eliminación del daño producido por los disparos y su limpieza se relacionaba directamente con el bajo balance dinámico máximo y con el tiempo de la oleada inicial, como se muestra en la figura siguiente.



La figura anterior es importantísima, y muestra una comparación entre un *bajo balance estático* vs un *bajo balance dinámico*. Antes de explicar este gráfico se sabe que aproximadamente un 95% de las operaciones de disparos convencionales no logran un grado adecuado de bajo balance de presión u oleada inicial después de creados los perforados. Además se ha demostrado que la presión estática real de las operaciones de disparos con bajo balance, a menudo no es suficientemente grande y no se aplica con la suficiente rapidez como para limpiar los túneles de los disparos tal

como se puede observar en el extremos superior izquierdo; además, es probable que el pozo vuelva a una condición de balance o sobre balance.

En cambio se observa en el extremo superior derecho que las operaciones de disparos en condiciones de bajo balance dinámico generan una rápida caída de la presión alrededor de las pistolas, generando un grado de bajo balance máximo u óptimo, para la obtención de perforados limpios.

También se observa que las micrografías muestran una sección transversal delgada de daño visible, después de una prueba de disparos en condiciones de bajo balance estático (extremo inferior izquierdo). En la cual el daño se ha dividido en 3 zonas. La zona 1, cuyo espesor es de unos 3mm, los granos de formación y los límites de los granos han sido triturados o fracturados, en la figura se observa esto sobre la línea roja. En la zona 2, cuyo espesor es de unos 7 mm, el daño inducido por los disparos es menos extensivo y está mayormente confinado a los granos individuales fracturados. En esta zona la porosidad y permeabilidad se encuentran esencialmente intactas, la cual se observa también entre la línea verde y la línea roja. Ahora bien en la zona 3, más allá de la línea verde, el daño inducido por los disparos es insignificante; solo se observan algunos granos fracturados. Se trata básicamente de roca inalterada. En cambio durante las pruebas de operaciones de disparos bajo condiciones de bajo balance dinámico. La aplicación rápida de grandes diferencias de presión en condiciones de bajo balance y oleada inicial instantánea, removió todo el daño de la zona triturada o la zona 1 y también la mayor parte del daño de la zona 2 sobre la línea verde; en la cual podemos observar una banda angosta de 2.5mm de granos levemente fracturados (extremo inferior derecho). Este método crea túneles de gran diámetro con daño mínimo a la permeabilidad, lo que se correlaciona con una matriz de roca esencialmente sin daños, o inalterada, y una eficiencia de flujo en los núcleos extremadamente buena.

Colectivamente, estos resultados constituyeron la base de las operaciones de baleo en condiciones de bajo balance dinámico, un nuevo enfoque en la limpieza de los disparos. Este sistema de baleo para operaciones de disparos limpios especifica condiciones de pozo y configuraciones de escopetas singulares para generar una caída instantánea de presión, alrededor de las escopetas, durante la detonación de las cargas.

Las operaciones de baleo en condiciones de bajo balance dinámico pueden llevarse a cabo en forma independiente de las condiciones de pozo iniciales para crear la caída de presión y la rápida oleada inicial requeridas a fin de generar un alto esfuerzo de corte (cizalladura) alrededor de los túneles de los disparos, inmediatamente después de la detonación de la carga. La ruptura por cizalladura de la zona triturada, causada por la significativa reducción de presión del pozo más que por la erosión de los túneles debido al influjo de fluido desde la formación, parece desarrollar un rol importante, quizás vital, en la limpieza de los disparos.

Se diseñan específicamente las sartas de escopetas, el tipo y número de cargas, y las condiciones hidrostáticas de pozos iniciales para controlar la magnitud del bajo balance de presión dinámica y la tasa de la oleada inicial desde la formación. Cuando los fluidos del pozo de alta presión rellenan los portadores de cargas inmediatamente después de las operaciones de disparos, se crean condiciones de bajo balance casi instantáneo e influjo alrededor de las pistolas.

Los pozos disparados con este proceso han demostrado un desempeño significativamente mejor que los pozos baleados con los métodos convencionales. Este método eliminó la necesidad de contar con operaciones de limpieza con ácido en ciertos yacimientos de baja permeabilidad o compactos.

La siguiente figura es un esquema clásico de la sarta de baleo bajo condiciones de bajo balance dinámico. Desde abajo hacia arriba, este arreglo constaba de un medidor de presión y un transportador, la escopeta operada con la tubería de producción, un cabezal de disparo, un empacador de fondo de pozo recuperable con una sección de retención, y una herramienta con Válvula Dual Remota Inteligente (IRDV), que podía cerrarse antes de que las escopetas se dispararan y fueran luego reabiertas por los pulsos de baja presión proveniente de la superficie.



En comparación con las operaciones de baleo convencionales, los diseños con bajo balance dinámico incrementan la productividad e inyectividad del pozo y mejoran la eficiencia operacional. Los operadores han aplicado los diseños y técnicas de las operaciones de baleo con bajo balance dinámico para terminar o re-terminar en casi todos los países del mundo ahora aplicados desde el año pasado en Venezuela y Ecuador a principios de este año con éxitos rotundos. Más adelante en este trabajo

de tesis mostrare los resultados de esta nueva técnica para corroborar el éxito y su posible aplicación en el Perú.

7. SELECCIÓN DE POZOS CANDIDATOS

Todos los pozos, tanto productores como inyectores, deberían ser considerados como potenciales candidatos para la aplicación de la técnica de bajo balance dinámico. La evaluación del tipo de roca, tipos de fluidos, porosidad y permeabilidad de la formación y la ejecución de simulaciones, ayudan determinar si la técnica de bajo balance dinámico resultaría útil a un pozo. En la mayoría de las áreas, las terminaciones de pozos nuevos y existentes se beneficiaran con la aplicación de operaciones de baleo con bajo balance dinámico.

La mayoría de pozos de inyección son excelentes candidatos para la aplicación de la técnica de bajo balance dinámico, porque los perforados dejados por los disparos son limpios y son esenciales para lograr una inyectividad óptima. El logro de un bajo balance dinámico adecuado asegura la presencia de suficiente oleada inicial para eliminar el material suelto de los perforados de los disparos antes de comenzar la inyección. Además, impide que los detritos y partículas finas de la formación sean inyectados y obturen las gargantas de los poros de la formación.

Esta técnica de bajo balance dinámico ha resultado particularmente efectiva en formaciones de baja permeabilidad que requieren un bajo balance de presión extremadamente alto para la limpieza de los disparos, ya que estas requieren un mayor diferencial de presión inicial. Tales diferencias de presión suelen ser difíciles de lograr durante las operaciones de baleo convencionales en condiciones de bajo balance estático.

Las operaciones de baleo con un bajo balance dinámico ayudan a evitar el desplazamiento costoso e inconveniente de los fluidos de un pozo con un líquido más liviano o un gas inerte para lograr un bajo balance de presión requerido.

Los candidatos más prioritarios, es decir aquel que aporta mayor valor para los operadores son pozos considerablemente candidatos para el mejoramiento de la productividad. También se incluyen a pozos que requieren operaciones costosas para establecer un bajo balance estático adecuado, pozos que habitualmente necesitan

lavados ácidos de los perforados después de las operaciones de baleo, y aquellos que requieren diferenciales de presiones altas, con la finalidad de obtener en el pozo una condición de bajo balance.

El proceso de selección de esta técnica se centra en el mejoramiento de la relación entre la permeabilidad de la zona triturada y la permeabilidad de la formación (K_c/K) para mejorar el desempeño del pozo. Un bajo balance dinámico genera relaciones (K_c/K) cercanas a 1. Las relaciones (K_c/K) para las operaciones de baleo con bajo balance estático oscilan entre 0.1 y 0.4 en los mejores casos.

Tanto la presión de poro como la formación deberían considerarse durante el proceso de selección de candidatos. Se ha baleado con éxito pozos con presiones de formación de solo 1000 psi y permeabilidades de apenas 0.5 md utilizando la técnica de bajo balance dinámico.

8. APLICACIONES RECIENTES

Para este tema de tesis he elegido 3 aplicaciones acerca de la aplicación del bajo balance dinámico, los cuales básicamente son las últimas aplicaciones a campos en Sudamérica y a EEUU. Estas aplicaciones han sido exitosas, y hoy en día se siguen aplicando con más confianza y frecuencia, debido a los resultados que se han obtenido con este método en los diferentes campos alrededor del mundo. Esperando así que no sea indiferente la aplicación de este método en nuestros campos petroleros de nuestro país. A continuación se detallaran las aplicaciones con sus respectivas conclusiones y resultados.

8.1. Campo de Brady- EEUU (Febrero 2004)

Resumen:

Las completaciones en la formación weber han sido históricamente baleados con un sobre balance y luego estimuladas con un lavado ácido. Los rates antes del lavado ácido fueron de casi 0 Mcf/D. El lavado ácido fue un importante paso en el proceso de completación. El reservorio de gas en esta formación tiene baja permeabilidad (0.5-1.5 md) y está ahora con una baja presión (2800 a 2300 psi a 14000 ft). Los rates típicos fluyentes para estos pozos están en el rango de 1 a 5 MMcf/D. Una

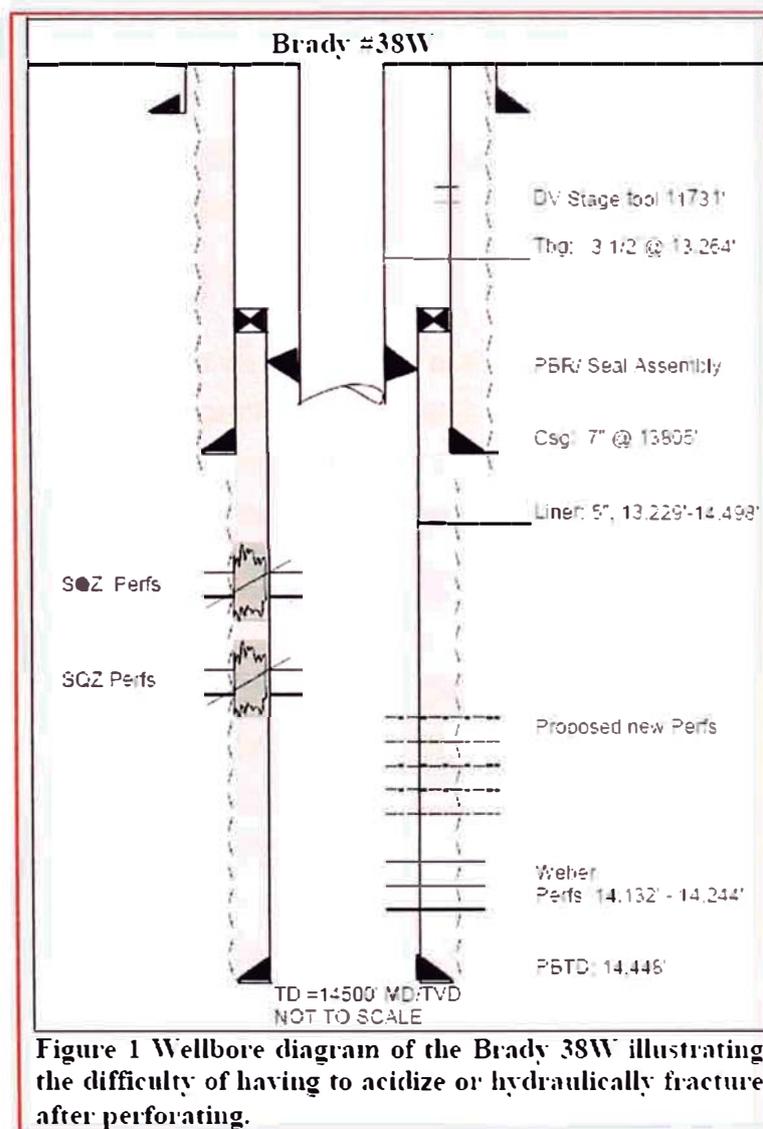
nueva técnica de baleo utiliza el método de bajo balance dinámico que fue implementada en dos pozos, Brady 38W y Brady 56W. Los pozos fueron baleados con TCP con sobre balances de 3250 y 3750 psi respectivamente. El método de bajo balance dinámico crea un bajo balance instantáneo aunque el espacio anular entre la escopeta y el revestimiento está inicialmente con un sobre balance. Este método de baleo también deja como resultado una gran disminución del daño o skin. La prueba es el éxito de los dos pozos, los cuales tienen rates iguales o mayores a los pozos existentes y sin requerir luego del baleo una estimulación ácida. De las comparaciones históricas de los 18 completaciones anteriores, estos pozos debieron tener cerca de cero en rate sin estimulación ácida cuando se balea usando un sobre balance inicial de hasta 3750 psi en el anular. Esta aplicación discute el nuevo diseño del baleo bajo condiciones de bajo balance dinámico y su aplicación a reservorios de baja permeabilidad y baja presión.

Antecedentes:

El campo de Brady fue descubierto en 1973 con la completación del pozo Brady 1W en la formación Weber a la profundidad de 14000 ft. La presión original del reservorio fue de 5700 psi o 0.41 psi/ft. 14 pozos adicionales fueron perforados desde 1973 hasta 1975 y completados en la misma formación Weber. Una planta fue construida para tratar y reciclar el gas de la formación. Un pozo adicional fue perforado en 1982 y luego otro en 1985. La formación Weber consiste de aproximadamente 600 ft de arenisca con lutitas múltiples y dolomita. Las prácticas de completación para esta formación típicamente consisten de baleo selectivo de 1 SPF a través de muchos intervalos bajo una columna llena de fluido. Después del baleo, la tubería de producción (tubing) y el packer fueron corridos y el fluido del pozo fue desplazado con nitrógeno. Una prueba de flujo fue luego desarrollada. El desempeño pobre usual de los pozos requirió un tratamiento ácido con HCL/HF que generalmente produjo muchos más resultados favorables. Tres de los 18 pozos tuvieron que estar naturalmente fracturado para mejorar el desempeño.

En el 2002, una recompletación en la sección más alta del Brady 38W fue asistida usando el baleo de bajo balance dinámico. Este proceso fue escogido debido a la complejidad del pozo. La siguiente figura 1 ilustra como la presencia de un squeeze antiguo encima de la zona de interés complicó la posibilidad de hacer un estimulación

con un tratamiento ácido. La existencia de perforados de un squeeze también crea complicaciones cuando se considera la necesidad para una posible estimulación a través de fracturas si el baleo solo no crea los resultados requeridos. Fue determinado que el baleo bajo balance dinámico produjo la mejor opción posible para una completación no estimulada. El más grande reto en la aplicación de esta técnica fue reconocer y aceptar que las condiciones iniciales estáticas justo antes del baleo podría actualmente ser 3250 psi en sobre balance. Sin la creación de una condición dinámica, este pozo podría necesitar una estimulación adicional.



Más tarde en el mismo año, Anadarko decidió perforar un nuevo pozo en la formación Weber. Este nuevo pozo proveyó la opción de escoger una combinación de baleo y estimulación deseada.

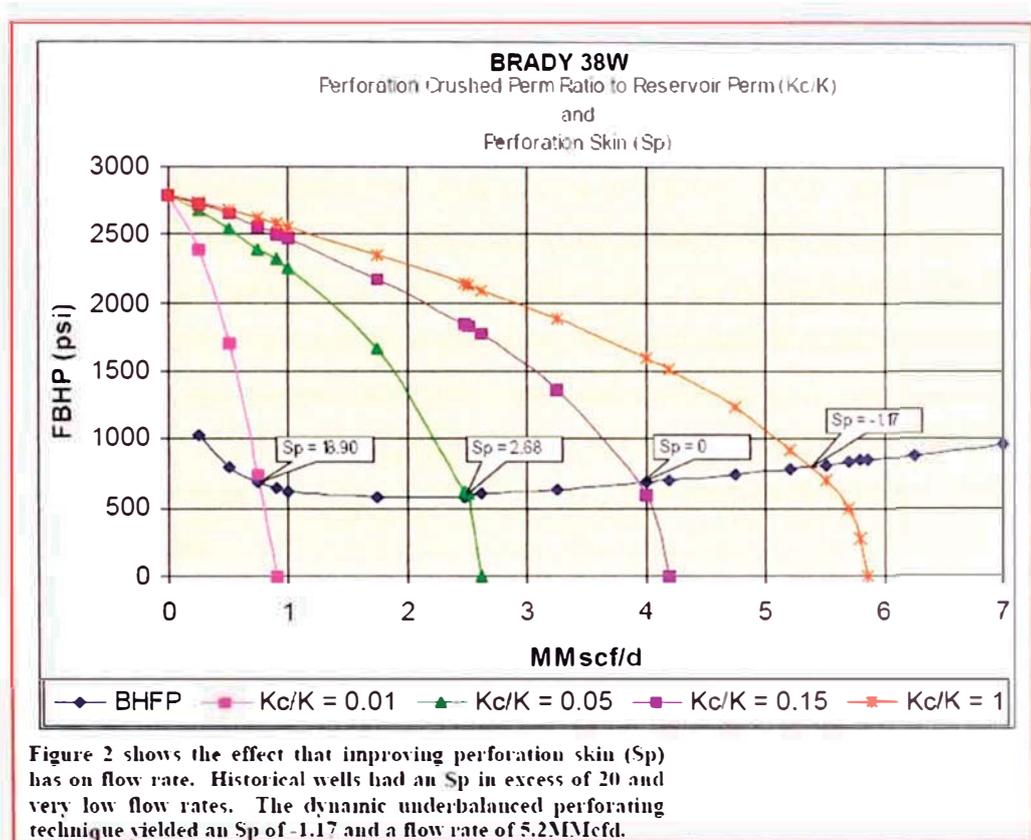
Los resultados de la técnica de baleo bajo balance dinámico fue elegida para esta nueva perforación del pozo, el Brady 56W. En este caso, el pre baleo en condiciones estáticas será mayor que el Brady 38W en 3750 psi en sobre balance. Otra vez basado en la historia este podría ser un candidato a una estimulación adicional a menos que nosotros estemos en la capacidad de crear una condición de bajo balance dinámico.

Los resultados de esta completación fueron muy exitosos y crearon suficiente interés para garantizar investigaciones y otras aplicaciones de esta técnica de baleo en otros campos alrededor del mundo.

Análisis Nodal Previo al Trabajo:

Como parte del proceso de determinar qué es lo que se espera del proceso de recompletación, fue desarrollado un análisis nodal para simular varias condiciones posibles. El macheo fue hecho de data cercana al performance del pozo y un estimado fue hecho para determinar un rate a un skin cero.

La figura 2 es una representación de un pre-Job nodal para el Brady 38W. A la presión actual estimada este pozo pudo haber sido capaz de producir aproximadamente 3.85MMcfd sin daño. Claro está sin acido, el daño históricamente podría haber excedido a 20 y el rate podría haber sido mínimo.



Baleo Bajo Balance Estático:

King publico datos de una prueba de campo para pozos de petróleo y gas que fueron completados con TCP. Los pozos fueron completados con rangos de bajo balances (la condición donde la presión del pozo es mucho menos que la presión del reservorio). Todos los pozos fueron estimulados con ácido para limpiar el daño de los perforados. El índice de productividad, IP, fue medido después del baleo y después de la estimulación acida. Si el IP después de la estimulación fue menor que un 10% incrementándose solamente por el baleo, entonces King sugirió que un nivel de aplicación del bajo balance fue suficiente y casi la estimulación acida en el pozo no requerirá. Tariq, calculo el mejor ajuste entre los dos datos (el ácido requerido y no requerido, ver la figura 9 de referencia 2). La ecuación 1 da el mínimo bajo balance requerido para eliminar la estimulación acida.

Mínimo Bajo Balance, $\Delta P=3000/K^{0.4}$ (1)

Para la formación Weber que fluctúa en un rango de permeabilidades entre 0.5-1.5 md, la ecuación de arriba brinda el rango del mínimo y máximo bajo balance (3960 y 2550 psi), considerablemente mayor a sus 2800 y 2300 psi como presión de reservorio. La implicancia es que si aun el pozo fuera perforado sin fluido en el pozo, el máximo bajo balance sería de 2800 psi o menor en las secciones más depletadas, y por lo tanto, cerca del pozo la estimulación acida sería requerida para el pozo para que fluya a su máximo potencial. Adicionalmente, King nunca supuso que si el mínimo bajo balance sería usado, todos los perforados podrían ser limpios. Por limpieza, decimos que hay un 100% de disparos efectivos y no hay zona triturada debido al baleo.

Usando la ecuación de Behrmann para el mínimo bajo balance, y asumiendo un 8% de porosidad y 6400 psi de esfuerzo compresivo de confinamiento (USC) y permeabilidad de 0.5-1.5 md. Calculamos un máximo y un mínimo bajo balance para obtener perforados limpios de 6390 psia y 4430 psia respectivamente. Esto requiere una condición bajo balanceada que es substancialmente mayor que la presión del reservorio.

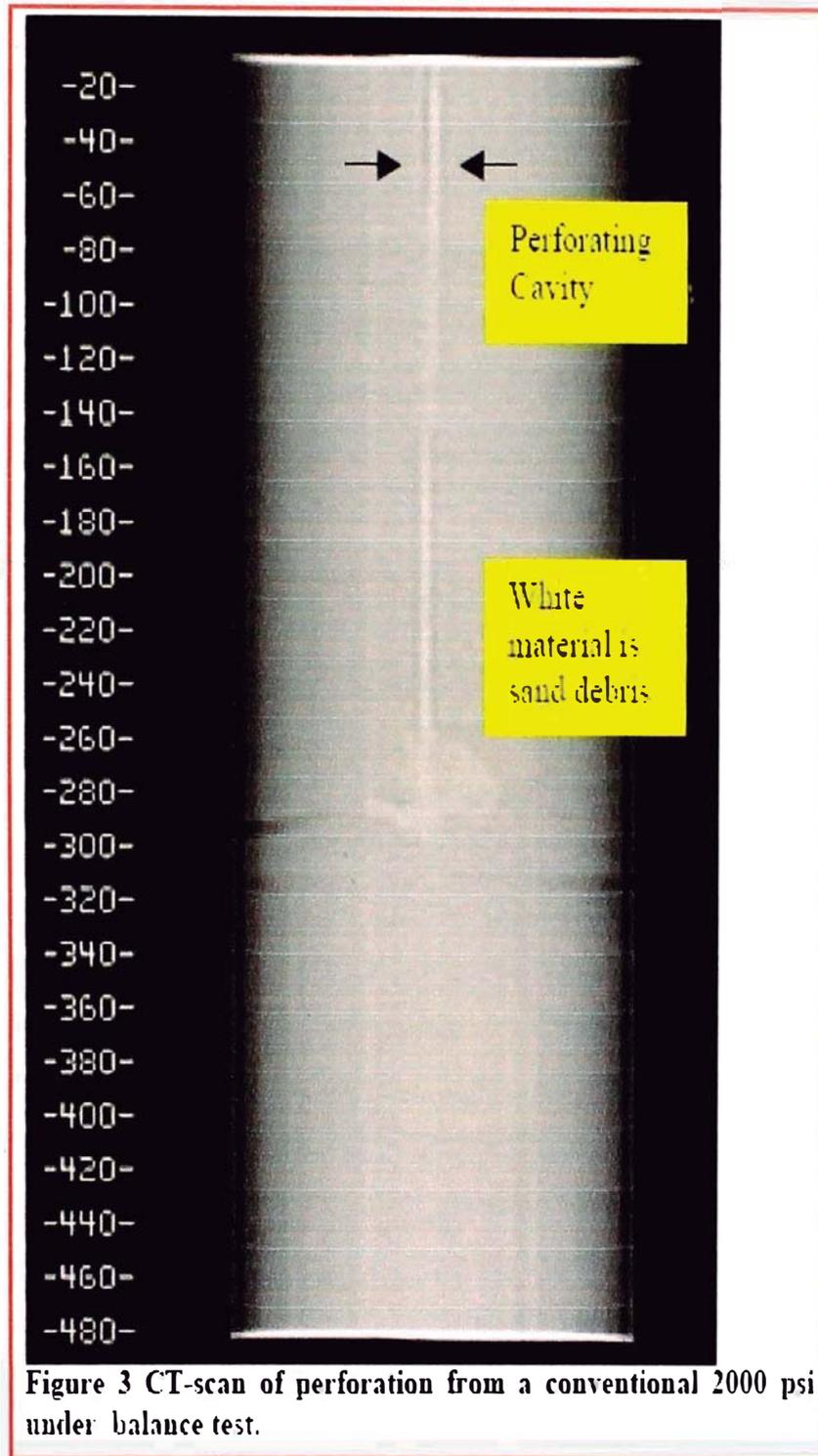
Las pruebas de baleo realizadas por Schlumberger en una roca de gas entre 1-2md saturada con salmuera dio una eficiencia de flujo (CFE) de 0.64 para un bajo balance de 2000 psi. La CFE es el IP experimental dividido por el IP teórico para un perforado equivalente sin daño. La cavidad del perforado fue completamente llenada con arena o escombros como se muestra en el CT-scan de la figura 3.

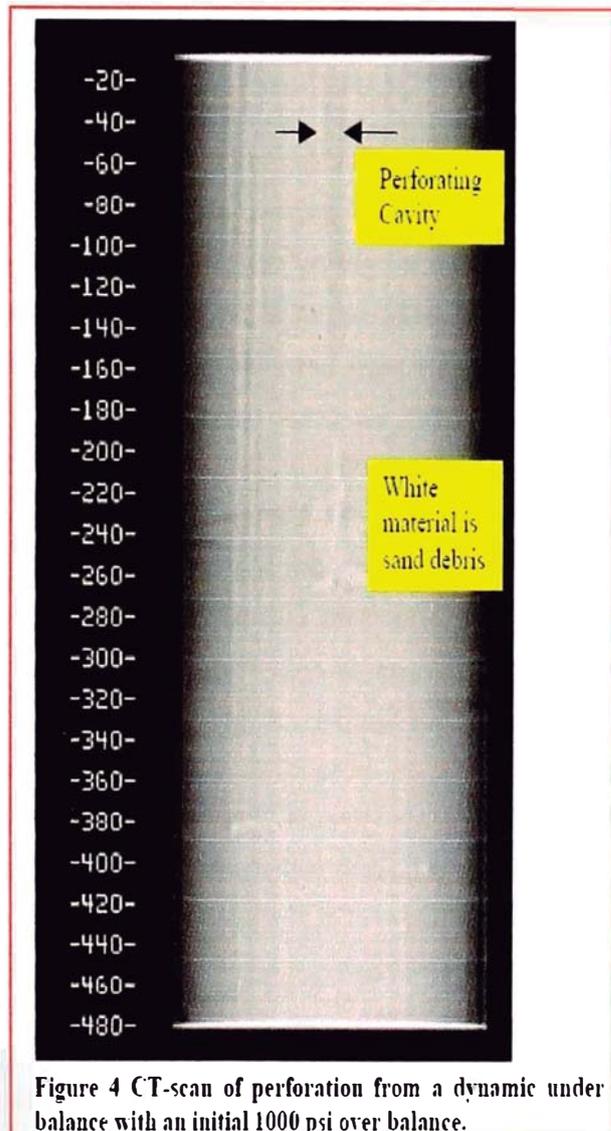
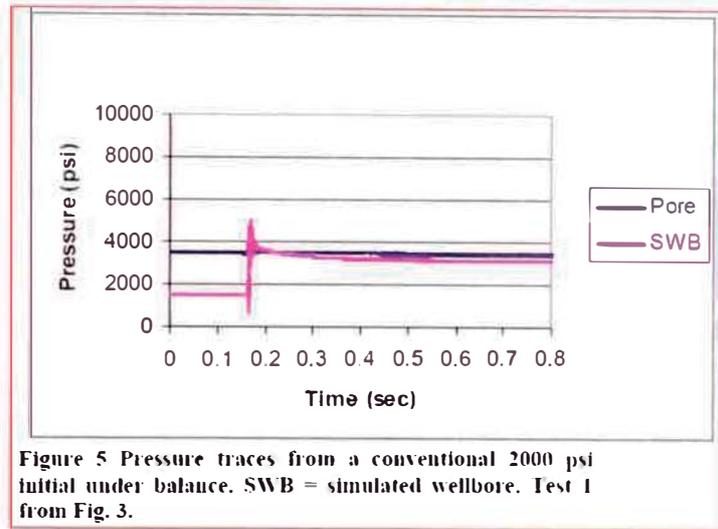
Una prueba de un bajo balance dinámico resulto en un CFE de uno. El resultado fue una cavidad de diámetro largo y un baleo sin restos de arena cerca al 75% de la profundidad del perforado mostrado en la figura 4. Esta prueba motivo a que la aplicación de el bajo balance dinámico podría proveer perforados limpios en un reservorio de baja permeabilidad.

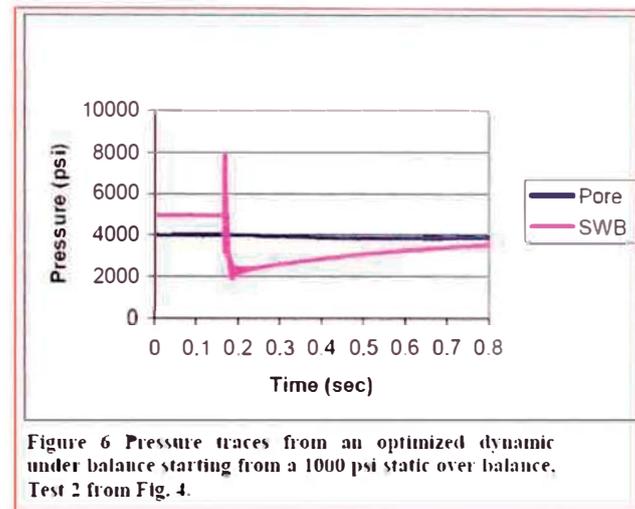
Baleo Bajo Balance Dinámico:

Un bajo balance dinámico es el actual bajo balance obtenido durante aproximadamente los primeros 100 milisegundos después de la iniciación del evento de baleo. Este bajo balance dinámico está en función de: 1) las presiones iniciales del pozo (wellbore) y el reservorio, 2) la escopeta de baleo, 3) el diseño de la carga, 4) la geometría del pozo (wellbore), y 5) la permeabilidad del reservorio. Un bajo balance dinámico puede ser obtenido independientemente de cuándo o no las condiciones iniciales estáticas estén con un bajo balance, sobre balance o balanceado. Para obtener un bajo balance dinámico, el sistema y proceso del baleo es diseñado para crear un bajo balance instantáneo durante el baleo. Este bajo balance dinámico puede ser creado inmediatamente después de de la detonación de la carga (menos de 0.1 segundo) para poder efectivamente remover la zona triturada. Por tanto, la sarta de baleo debe ser diseñada según las condiciones. El flujo surgente dentro del pozo y dentro de la escopeta remueven las partículas de la zona triturada de las cavidades o perforados que se genero en el baleo. Para prevenir el retorno a un estado sobre balanceado en el hueco perforado o pozo (wellbore) las presiones del pozo y poral son igualizadas.

Los ejemplos de bajo balance dinámico para las pruebas, son las que se muestran en las figura 3 y 4, además con sus respectivas simulaciones de presión en tránsito mostradas en la figuras 5 y 6. Hay que notar que para un bajo balance estático convencional de 2000 psi (figura 5), la fluctuación de presión fue menos de 200 psi y no ocurrió hasta aproximadamente los 0.120 segundos después que la carga fue disparada. Por otro lado, la aplicación del bajo balance dinámico creó una fluctuación de presión de 3000 psi (figura 6) dentro de los 0.025 segundos después que la carga fue disparada a pesar de empezar con un sobre balance de 1000 psi. Las cuales pueden ser vistas en las graficas 5 (convencional) y grafica 6 (dinámico) con un mayor detalle.

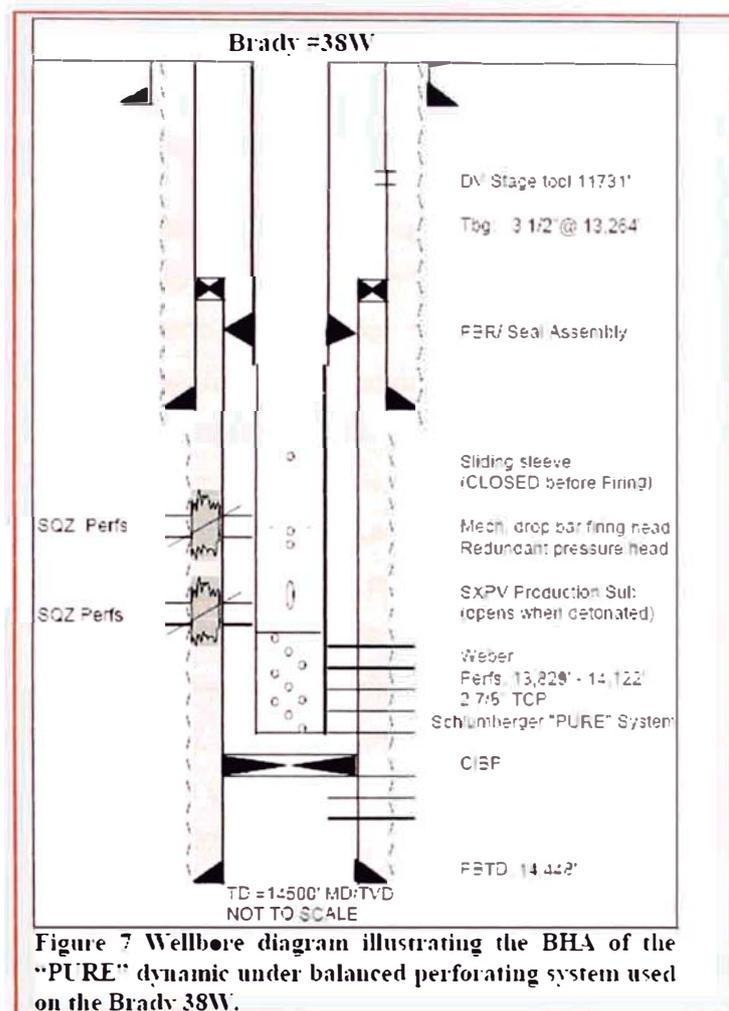






Ensamble para Fondo de Pozo (BHA):

Los pozos de Brady fueron completados con TCP debido a la baja permeabilidad y baja presión del reservorio de gas, la sarta de completación y el proceso de baleo fueron diseñados para permitir un flujo inmediato y una limpieza de los perforados. Esto fue hecho para **minimizar** la cantidad de liquido que estuvo en el tubing que el gas tendría que levantar durante el flujo inicial en el periodo de limpieza. La presión de fondo (BHP) con el pozo lleno de fluido de completación es 6050 psi. Con el propósito de tener en el tubing la hidrostática en cabeza mucho menor que la presión del reservorio, el BHA y el espacio anular debajo del packer (rathole), q es el espacio anular entre las escopetas y la tubería de revestimiento, y esta necesita estar aislada del tubing, pero al mismo tiempo abrir al tubing inmediatamente después del baleo. Para llevar a cabo esto, una válvula especial de producción fue usada para brindar una aislación entre el tubing, las escopetas, y el espacio anular debajo del packer y abrirse cuando la cabeza detonante es iniciada. Por lo tanto, hay casi un flujo instantáneo desde el rathole y el reservorio dentro del tubing cuando las escopetas son disparadas. Un diagrama del wellbore es proporcionada en la figura 7 mas la ilustración del BHA.

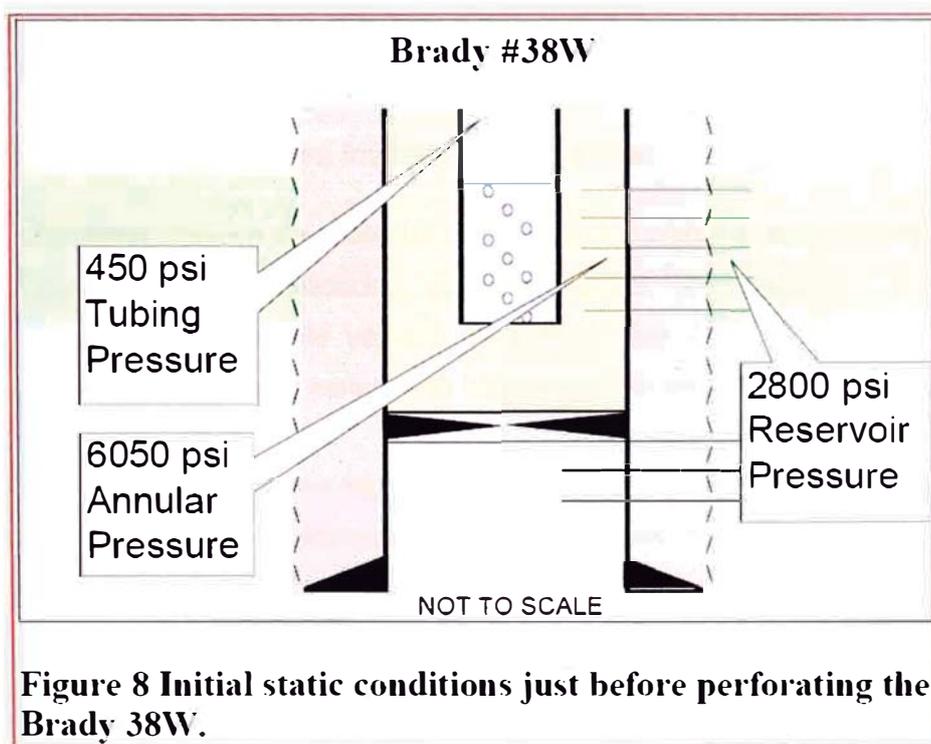


Un BHA genérico, del fondo es: escopetas de 2-7/8 pulgada con alta densidad de disparos (HSD) diseñadas para crear un bajo balance dinámico, una válvula de producción que actúa rápidamente, cabezas de disparo (donde se produce la detonación), las camisas deslizables (sliding sleeve) y un packer. Una consideración adicional en el diseño requiere un cálculo de cuanto la presión final del wellbore sería si la válvula de producción no está abierta. Aun cuando un bajo balance dinámico es creado, si la combinación del volumen del rathole, presión del wellbore, volumen interno de la escopeta y la masa de explosivos no son las correctas, la presión del wellbore podría ir de un sobre balance a un bajo balance y otra vez regresando a un sobre balance, debido a los procesos de apertura de los perforados. Esto podría resultar en un daño a los perforados. Hubo suficiente volumen de escopeta en el

Brady 38W que este no fue un problema. Sin embargo, los 3000 ft. de rathole en el Brady 56W requirió escopetas vacías.

Procedimiento Operacional:

Con el pozo lleno de fluido de completación, el TCP fue corrido en el hueco con la camisa (sliding sleeve) abierta. Una vez en profundidad el packer fue fijado o sentado y el sliding sleeve cerrado, confinando 6050 psi en el espacio anular debajo del packer (rathole). La tubería de producción (tubing) fue suabeado hasta un nivel de liquido de aproximadamente 1000 ft. Encima del packer o 12000' debajo de superficie. Las condiciones estáticas iniciales en el pozo en este punto están sobre balanceadas y son ilustradas en la figura 8. El equipo de superficie fue instalado, el tubing fue dejado abierto, y la barra de impacto o drop bar, la cual sirve para impactar la cabeza de disparo para que así se produzca la detonación de las cargas, fue soltada. Después de un tiempo específico, la cabeza de disparo detono. Cuando la cabeza de disparo detono, instantáneamente la válvula de producción se abre y un bajo balance dinámico fue generado. Con 2800 a 2300 psi en el reservorio, 6050 psi en el espacio anular debajo del packer, y 450 psi en el tubing, todos los fluidos en el sistema flujo inmediatamente a superficie.



Brady 38W resultados.- El análisis nodal pre-operación indico un rate esperado de 3.85MMcfd si el daño del baleo fuese cero. Históricamente, muchos menores rates y muchos grandes daños o skins (en exceso a 20) fueron encontrados con baleo sobre balanceado y sin tratamiento ácido. El pozo logro un rate mantenido de 5.2 MMcfd después de unas horas de ser baleado. Esto es estimado que el actual skin a través de los perforados es de -1.17 debido a la mejora creada por la técnica del bajo balance dinámico.

Brady 56W resultados.- La distancia desde el packer hasta el fondo del pozo para Brady 56W fue cerca de 3000 ft. La distancia al tope de los perforados debajo del packer fue de 2000 ft. Como se menciona, este gran volumen en el rathole requirió escopetas vacías, es decir que no contenga fluido, para asegurar que el rathole estuviera bajo balanceada o balanceada después de la creación del bajo balance dinámico. El pozo experimento algunas dificultades en descargar todo el fluido del anular y posteriormente se determino que el reservorio tuvo una baja presión de fondo esperada (2300 psi vs 2800 psi). No obstante, después de suficiente tiempo para la limpieza, el pozo desarrollo rates encima de lo esperado para un pozo sin daño o skin. El análisis nodal pre- operacional fue modificado para reflejar el mejor BHP. El rate nuevo esperado fue de 3 MMcfd. El pozo actualmente fluye a un rate mantenido de 4.2 MMcfd después de la limpieza. Este rate puede ser logrado en el análisis nodal con skin de -1.2.

En conclusión se obtienen los siguientes puntos:

- La nueva técnica de baleo bajo balance dinámico fue exitosamente aplicada a las bajas permeabilidades, bajas presiones del reservorio de gas Weber resultando en cálculo valores de daño o skin de -1.2. Este es una mejora significativa sobre la historia de los valores por encima de 20.
- La aplicación de baleo bajo balance dinámico elimina la constante necesidad de caros tratamientos ácidos o fracturas hidráulicas. A pesar de las condiciones estáticas de sobre balance de 3250 y 3750 psi, los pozos fluyeron naturalmente después del baleo.

- La aplicación de esta técnica de baleo bajo balance dinámico resulto que la producción de gas se vendiera más rápidamente, ahorrando días de trabajo en las operaciones de completación del pozo, en comparación con el método convencional y además elimino otros pasos operacionales que son caros.

8.2. Campo de Sacha- Ecuador (Octubre 2005)

Resumen:

Los componentes o factores más principales que intervienen en la ecuación del daño (skin) son el daño por invasión y el daño inducido por el baleo. La industria del petróleo ha tratado el problema de la invasión con el uso de tratamientos de estimulación intentando recuperar la permeabilidad perdida a través de la formación dañada, o con penetraciones profundas de las cargas tratando de atravesar o bypassar la invasión del daño. El baleo es conocido por crear una zona de baja permeabilidad (zona triturada) en la formación alrededor de los túneles o perforados que a la vez constituye una restricción al flujo, el cual puede empeorar la productividad o inyectividad de los pozos. Un diseño del baleo que garantice sobrepasar la invasión y al mismo tiempo eliminar el daño en el túnel es crucial en la obtención de una daño de cero (cero skin) y una productividad o inyectividad máxima.

Este trabajo nos habla de cómo se puede utilizar las técnicas de baleo para obtener cero daño (cero skin) y una productividad máxima. El método está basado en desarrollos teóricos y experimentales llevados a cabo en cores de tres campos en la cuenca oriental del Ecuador. Se realizaron simulaciones usando datos experimentales que permitió modelar el desarrollo o performance de las cargas del baleo y así determinar valores para la profundidad de la carga en la roca reservorio perteneciente a esa zona. También la profundidad de la invasión de daño para cada uno de los reservorios de interés fueron obtenidos mediante registros eléctricos, con el objetivo de diseñar trabajos de baleo para atravesar o bypassar la zona dañada.

Resolviendo la segunda parte del problema que involucra encontrar una forma para producir perforados limpios. Recientes trabajos de investigación han mostrado que las fluctuaciones de presión en el wellbore durante los primeros milisegundos después de detonar la escopeta actualmente gobierna la limpieza de los perforados o

túneles y no así el bajo balance estático, como originalmente se pensaba. Un trabajo de baleo que atraviesa o *bypasea* la zona de invasión, combinada con un nuevo diseño que garantice un bajo balance dinámico todo el tiempo, ha producido extraordinarios resultados en más de 40 trabajos de baleo en Ecuador. Los datos históricos de los campos que fueron completados convencionalmente con un bajo balance estático muestran en promedio de daño (skin) de +13 vs los -0.5 usando la metodología propuesta que es la de bajo balance dinámico y cargas profundas, con la cual se ha aumentado la producción de 300 a 400 BOPD.

Aplicación:

La metodología descrita aquí ha sido probada exitosamente en más de 40 trabajos de baleo en Ecuador, resultando en valores de daño mucho menores y productividades más grandes en un rango amplio de aplicaciones, incluyendo las nuevas completaciones, las re-completaciones, y en oportunidades para la mejora de la producción. El análisis del campo de Sacha y los resultados obtenidos en muchos otros campos en Ecuador son descritos para ilustrar la metodología.

Sacha es un campo gigante de petróleo localizado en la cuenca oriental del Ecuador (figura 1). El campo fue descubierto en 1969, fue puesto en producción en 1972, y es **actualmente** operado por Petroproducción, una sucursal de Petroecuador. A la fecha, Sacha tiene una producción acumulada de 700 millones de barriles de petróleo y produce aproximadamente 45 mil barriles de petróleo por día. Estructuralmente, Sacha es una anticlinal con una tendencia de norte a sur, con 32 km de longitud por 6 km de ancho, con una estructura de cierre de 240 ft. Los principales reservorios en Sacha son: desde el tope hasta la base, las areniscas del cretáceo Napo-U, Napo-T, y Hollin (figura 2).

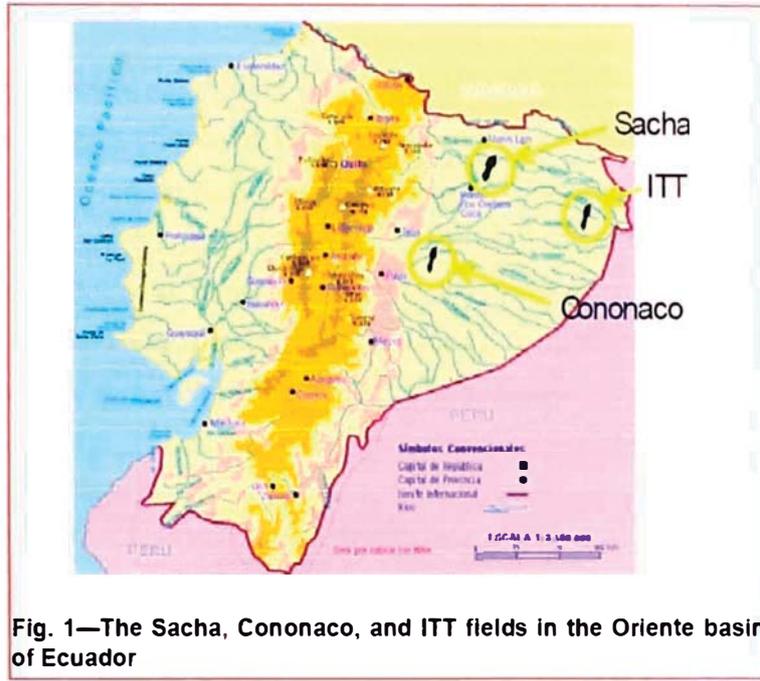


Fig. 1—The Sacha, Cononaco, and ITT fields in the Oriente basin of Ecuador

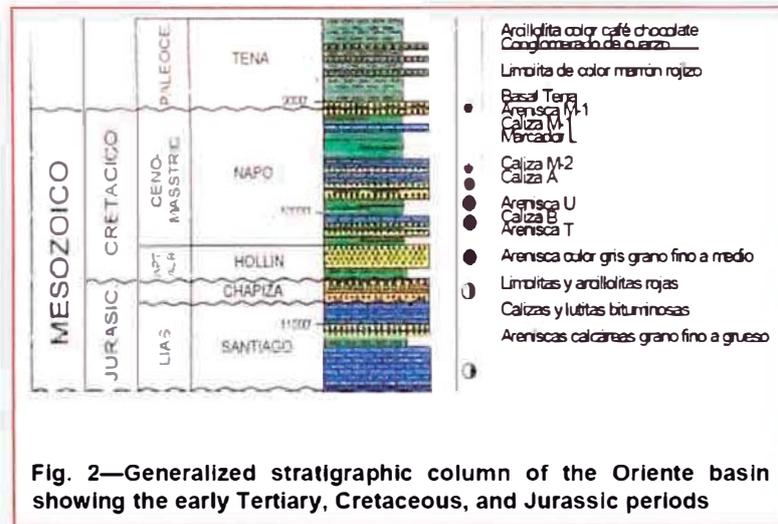


Fig. 2—Generalized stratigraphic column of the Oriente basin showing the early Tertiary, Cretaceous, and Jurassic periods

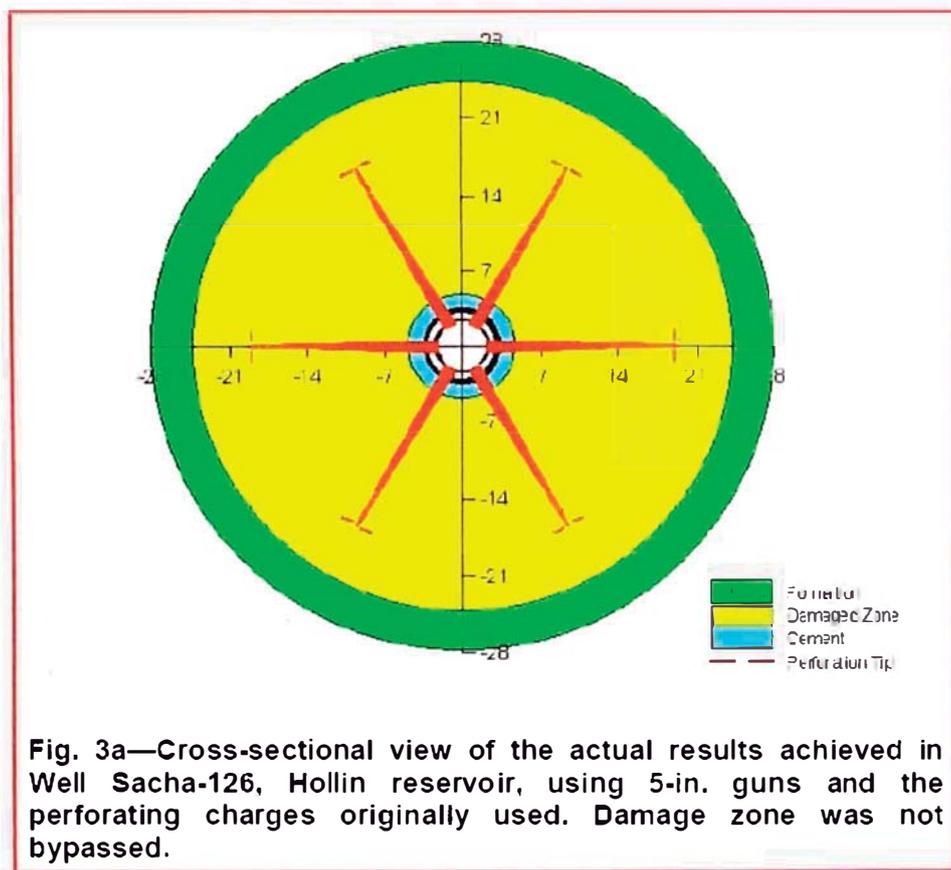
Las UCS (esfuerzos compresivos confinados) han sido medidos experimentalmente para cada uno de los reservorios en el campo de Sacha y promediados como siguen:

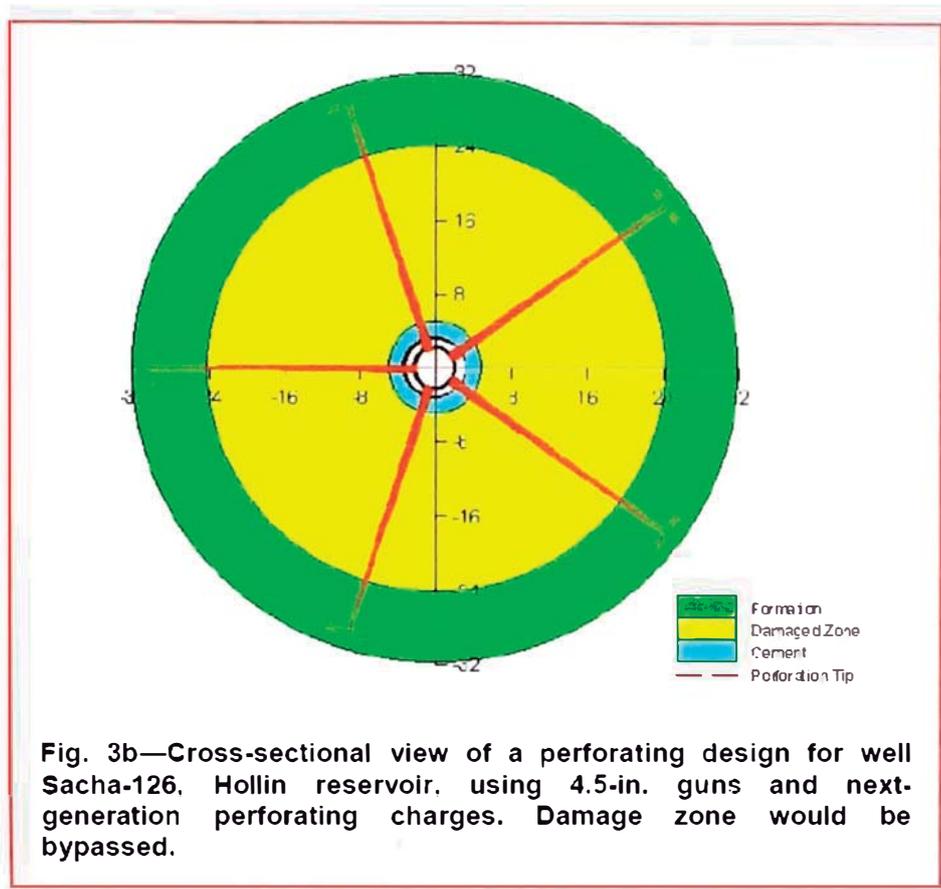
Co=9500 psi para Napo-u,

Co=4000 psi para Napo-T, y

$C_o=8000$ psi para Hollin

Con estos valores de UCS, un simulador de bala fue usado para simular el performance de las cargas en las rocas reservorios de Sacha, y proveer estimaciones confiables de la profundidad de penetración de las cargas históricamente usadas y para ser usados en el futuro. La información histórica servida para identificar oportunidades para el mejoramiento de la producción en casos donde el trabajo original de baleo no tuvo éxito en sobrepasar o bypasear la zona dañada. El caso del pozo Sacha-126 (figura3) ayuda a ilustrar este punto.





Los radios de invasión fueron obtenidos de un estudio estadístico basado en pruebas de presión en tránsito corridas después de las completaciones iniciales. Para el caso de Sacha, este fue encontrado que el radio de invasión en pulgadas para cada uno de los reservorios varía en el rango de:

$$5.1 \leq r_d \leq 17.5 \text{ para Napo-U,}$$

$$5.8 \leq r_d \leq 10.0 \text{ para Napo-T, y}$$

$$6.6 \leq r_d \leq 19.4 \text{ para Hollin.}$$

Para comparar las profundidades de las penetraciones con el radio de invasión estimado, esto fue posible para identificar objetivamente las cargas que serán exitosas en bypassar el daño provocado por la invasión. Con la finalidad de

desarrollar esta técnica, el radio de invasión fue asumido y este es igual a la longitud más grande de radio de invasión (r_d) en cada uno de los reservorios.

El estudio inicial de Cevallos y Flores confirmó que solo uno en los siete trabajos de baleo evaluados en el reservorio Napo-U y ninguno de los 17 trabajos analizados en Hollin fueron capaces de *bypasear* la zona de daño; así, claramente necesitamos cargas para obtener penetraciones más profundas. También fue encontrado que las cargas convencionales fueron suficientes para *bypasear* la invasión en el reservorio de Napo-T.

Para remover el daño inducido por el baleo, diseños de baleo a medida fueron usados para cada pozo, incorporando parámetros del reservorio, incluyendo presión y capacidad de flujo y geometrías del *wellbore* y escopeta. Como se menciona al principio, estos diseños usan cargas especiales y configuraciones de escopetas especiales para ayudar a garantizar un bajo balance dinámico todo el tiempo durante el trabajo de baleo. Un cuadro de uno de los pozos en el campo A en Ecuador está incluido en la figura 4^a, mostrando un bajo balance dinámico de 1250 psi. Para la comparación, un anterior trabajo convencional con TCP en el mismo pozo es mostrado en la figura 4b. Notar que en el último caso, el diferencial de presión llegó a ser positiva durante los primeros segundos después de la detonación; por tanto, los túneles o perforados no experimentaron el efecto de bajo balance, por lo cual no fueron limpiados como se esperaba, por lo tanto ocasionaron una producción mucho menor de lo esperado.

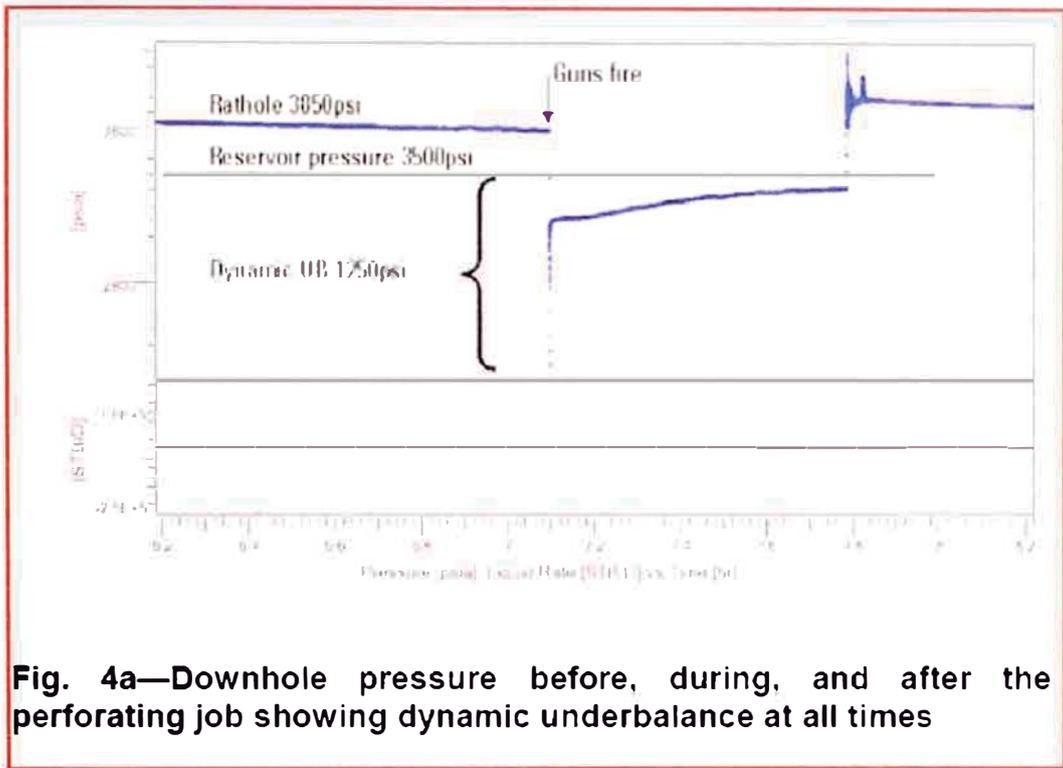


Fig. 4a—Downhole pressure before, during, and after the perforating job showing dynamic underbalance at all times

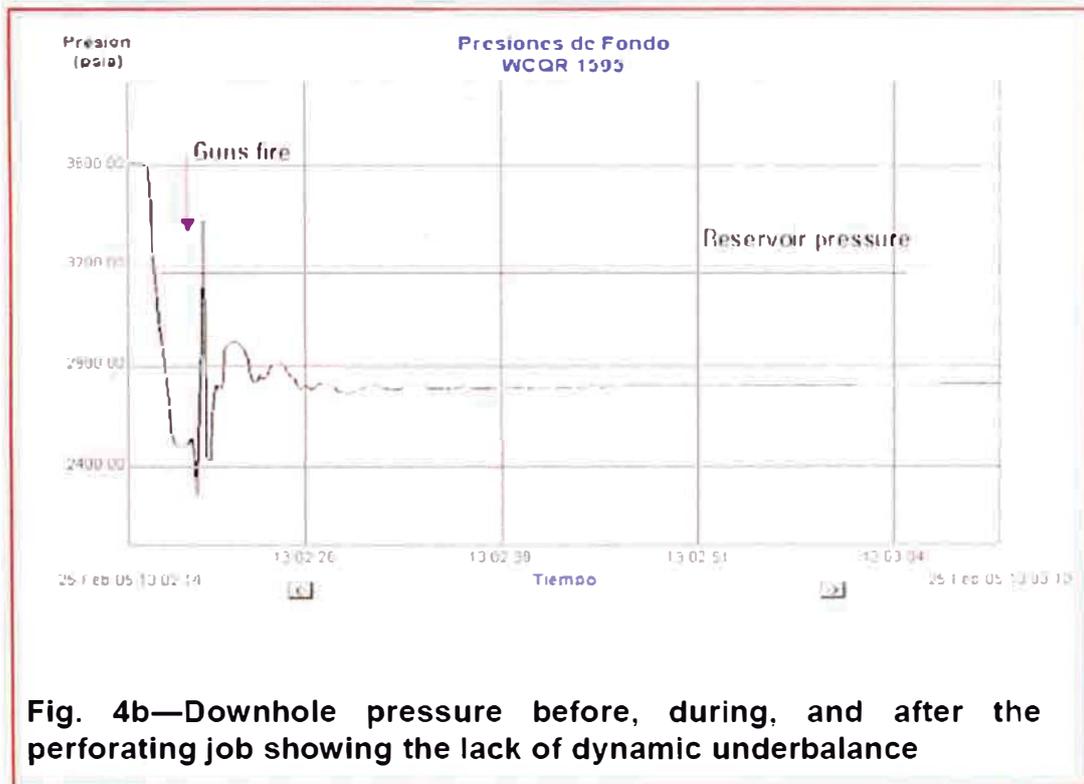


Fig. 4b—Downhole pressure before, during, and after the perforating job showing the lack of dynamic underbalance

La tabla 1 es un resumen de los datos de producción disponibles usando el método propuesto, incluyendo la producción antes del trabajo de baleo o la producción esperada; también incluye la producción después del trabajo de baleo. Las cuatro intervenciones para el mejoramiento de la producción usando esta metodología en el campo G produjo excelentes resultados, con hasta 5 veces más en el incremento de la producción previo al de los trabajos de rebaleo. Las dos nuevas completaciones en Auca resulto en hasta tres veces la producción esperada. Similarmente, producciones iniciales de nuevos pozos en el campo A fueron dos veces que la esperada, con daños (skin) de -1.1 y -1.5 en los pozos A-14 y A-17, respectivamente. Históricamente, los skin en este campo estuvieron en el orden de +5.

TABLE 1—SUMMARY OF AVAILABLE RESULTS USING THE PROPOSED METHOD

Well	Reservoir	Previous/Expected Production (B/d)	Production After Perforating (B/d)
G-2	Hollin Superior	200-300	1680
G-9	Hollin Superior	200-300	1060
G-9	Basal Tena	110	192
G-6	U + UM	166	430
Auca-51	Hollin Inferior	700-800	1650
Auca-53	Hollin Inferior	700-800	2250
S-167	Hollin Inferior	150	273
A-14	U inferior		1716
A-15	T Inferior		1396
A-17	T inferior		1415

Esta metodología también fue probada en 5 trabajos de baleo en otro campo, también en la cuenca Oriental. Pruebas preliminares de presión corridas en las nuevas completaciones en los pozos mostraron una reducción promedio del daño de +13 con baleo convencional a -0.5 aplicando la nueva metodología (figura5). Una parte importante del éxito es atribuible a la remoción efectiva del daño por baleo. Como un resultado, los operadores de los campos eliminaron los trabajos con acido usados previamente después de cada trabajo de baleo para limpiar los túneles o perforados.

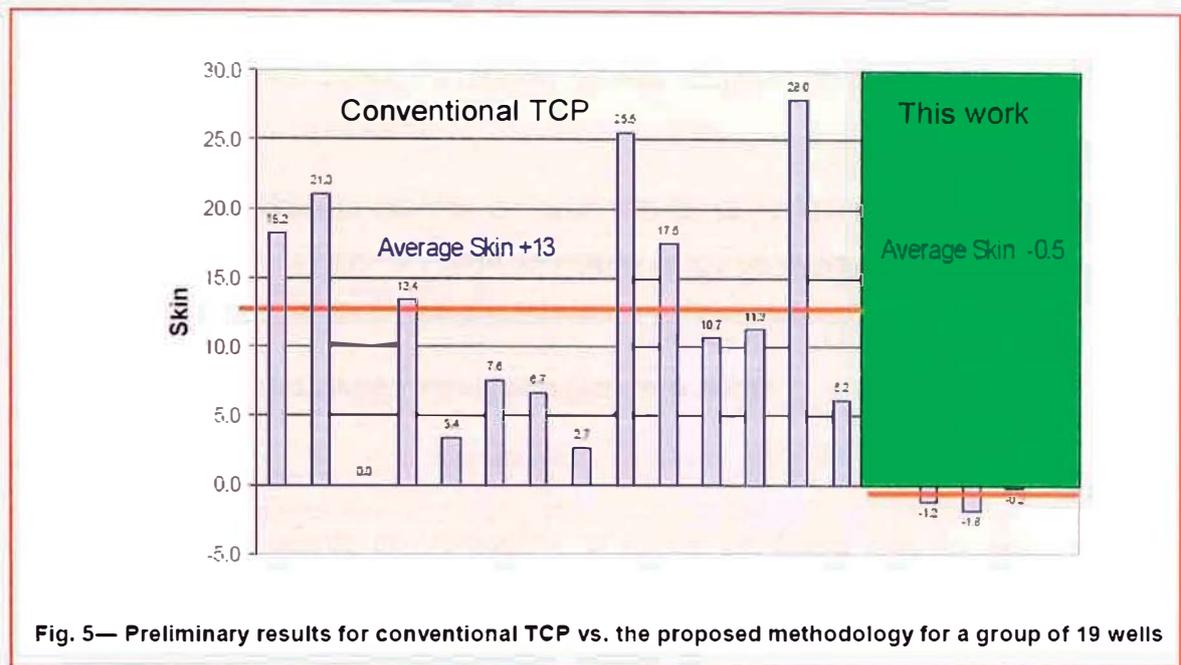


Fig. 5— Preliminary results for conventional TCP vs. the proposed methodology for a group of 19 wells

En conclusión se obtienen los siguientes puntos:

- Para lograr un daño de cero (skin cero) en un intervalo perforado, es necesario atravesar el daño debido a la invasión y remover el daño por el baleo.
- Diseñando un trabajo de baleo para atravesar o bypassar la invasión requiere tener la capacidad para correctamente predecir la profundidad de penetración en la roca reservorio para las cargas disponibles y los radios de invasión. Los UCS es la parte más crítica desconocida en la determinación de la profundidad de las cargas. Además, los UCS deberían ser obtenidos en el laboratorio, ya que las correlaciones no resultan en aproximaciones aceptables hechos como estudio de campo o estadístico.
- Los radios de invasión pueden ser estimados usando registros modernos encargados de determinar los mismos, o en el caso de completaciones antiguas usando un estudio estadístico basado en el análisis de las trasientes de presión. Juntando la profundidad de penetración con los radios de invasión hace posible la selección óptima de las cargas para atravesar el daño debido a la invasión.
- Una nueva tecnología para producir túneles o perforados limpios han sido aplicados. Los resultados obtenidos en más de 40 trabajos en Ecuador

muestran que el bajo balance dinámico puede ser alcanzado a través del proceso de baleo, resultando túneles limpios, libres de partículas de arena triturada y otros detritus.

- La metodología descrita en este trabajo puede ser aplicada efectivamente a cualquier reservorio y para un amplio rango de aplicaciones, incluyendo nuevas completaciones, re-completaciones, y para el mejoramiento de la producción.

8.3. Campo de Santa Ana - Venezuela (Febrero 2008)

Resumen:

Localizado al oriente de Venezuela, el campo de Santa Ana es parte de la más importante provincia de gas de Venezuela: el Distrito de Anaco. Sus principales zonas productivas son las formaciones El Merecure y San Juan, los cuales son areniscas caracterizadas por sus grandes permeabilidades (100-500 md) y bajas presiones (1200-2200 psi).

Los pozos en el Distrito de Anaco son normalmente baleados usando técnicas convencionales de bajo balance estático. La productividad de estos pozos fueron evaluados usando técnicas de análisis nodal unidos con simulaciones del comportamiento del baleo. La calidad y cantidad de datos obtenidos fueron limitadas o pocas. Sin embargo, un diagnostico cualitativo de estos resultados indicaron que la condición de bajo balance estático y las cargas usadas no fueron suficientes para limpiar efectivamente los perforados y sobrepasar la zona de daño cerca del pozo (wellbore).

El baleo en condiciones de bajo balance dinámico junto con grandes performances de cargas fueron seleccionadas como la tecnología que mejoraría la productividad en los dificultosos pozos de Santa Ana. Esta tecnología ha sido aplicada en escenarios similares a través de la industria en los recientes años, aun no hay documentación que fuese encontrada con este uso en ambientes de baja presión.

Este trabajo describe como el baleo en condiciones de bajo balance dinámico fue desplegado exitosamente, mientras sobrepasamos los limites sobre su aplicación. Para obtener una condición de bajo balance dinámico en ambientes de baja presión, la densidad de disparo tuvo que ser reducida a 2.5 spf, ya que se necesitaba crear un

alto diferencial de presión, no lográndola si es que aumentamos la cantidad de agujeros o perforados, ocasionando una preocupación acerca de sus efectos en la productividad del pozo. Dos pozos fueron seleccionados para esta prueba de campo. Ellos fueron baleados usando TCP/DST los cuales permitieron al pozo ser muestreado inmediatamente después del baleo. Detalles del diagnóstico, planeamiento, ejecución y evaluación de este proyecto son explicados.

La producción de gas resultante y el skin de cero representaron más de dos veces el incremento de la productividad comparada con la producción promedio del reservorio objetivo. Estos resultados demuestran la efectividad de la técnica bajo condiciones límites, y promueve su aplicación en escenarios similares en el mundo.

Este proyecto muestra la importancia del diagnóstico de la producción y el baleo, apoyando la aplicación de la tecnología y impulsando el baleo bajo balance dinámico para incrementar la productividad en campos maduros con baja presión.

Introducción:

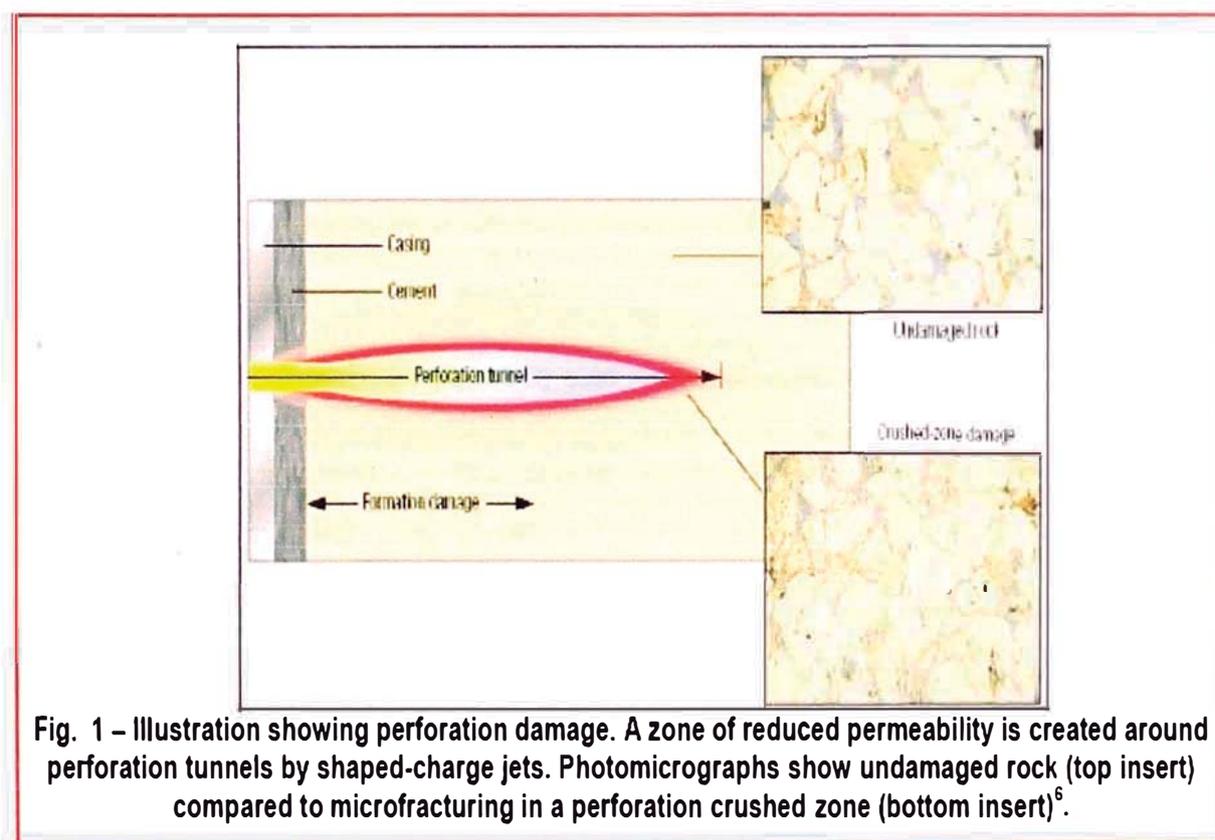
El baleo se puede definir como el proceso de conectar el pozo con el reservorio creando un túnel el cual va a través del revestimiento (casing), cemento y la roca reservorio. El principal objetivo del baleo es crear un túnel limpio suficientemente largo que pueda alcanzar la parte del reservorio no dañada. Este proceso es fundamental para la productividad del pozo y es supervisada durante las operaciones de completación.

Fue reconocido que el baleo fue un área que pudo ser mejorado en las completaciones de los pozos del Distrito de Anaco. Como un resultado, una evaluación cualitativa de baleo convencional fue hecha. Esta evaluación confirmó el vínculo entre la productividad pobre del pozo y el baleo y justificó las pruebas de campo de nueva tecnología en esta área.

Muchos de los desarrollos de tecnología de baleo han sido concentrados en obtener mayores profundidades de penetración. Sin embargo. Pocos avances han sido logrados con relación a la calidad del túnel o perforado. La industria ha confiado solamente en el bajo balance estático, el cual es ahora una técnica reconocida para los perforados limpios. El apropiado nivel de bajo balance estático ha sido

extensivamente investigado, sin embargo, investigaciones recientes han presentado evidencia relevante indicando que el bajo balance estático no es único factor que gobierna en la efectiva limpieza de los perforados.

Estas novedosas investigaciones han investigado las dinámicas del baleo en una escala de tiempo de milisegundos después de la detonación de la carga, el cual ha influenciado el concepto de baleo bajo balance dinámico (DUP). Experimentos de disparos muestran que el máximo bajo balance dinámico es durante el lapso de tiempo inicial, y no el bajo balance estático, el cual gobierna la limpieza de los perforados. Esta instantánea surgencia minimiza la invasión en la garganta poral los fluidos de completación, eliminando roca dañada y limpiando materiales sueltos del túnel o perforado (figura 1).



Una metodología ha sido establecida el cual toma la geometría del pozo, densidad de fluido, selección de la escopeta y propiedades del reservorio para desarrollar un diseño de baleo y condiciones iniciales del pozo para alcanzar un bajo balance dinámico. Esta metodología ha sido probada a través de muchas pruebas de campo que confirman su éxito en una gran gama de aplicaciones en diversos ambientes y condiciones.

El baleo bajo balance dinámico y cargas de alta performance fueron seleccionados como las tecnologías que mejoraría la productividad en los pozos complicados del Distrito de Anaco. Fue decidido probar la efectividad de estas tecnologías a través de una prueba de campo de 5 pozos, comenzando con dos de ellos localizados en el Campo de Santa Ana.

La prueba de campo incluyó una sarta DST/TCP con escopetas de alto performance y cargas de bajo balance dinámico desplegados en nuevos pozos verticales. Una prueba de pozo (well testing) fue desarrollado inmediatamente después del baleo. Este enfoque permitió la evaluación del desarrollo del baleo en una manera imparcial que respaldó los resultados de las pruebas de campo.

Descripción General del Campo:

El campo de Santa Ana (figura 2) está localizado a 400km al sureste de Caracas en el Oriente de Venezuela, abarcando un área aproximada de 110 km² y siendo parte del Distrito de Anaco, el cual es la más importante provincia de gas de Venezuela.

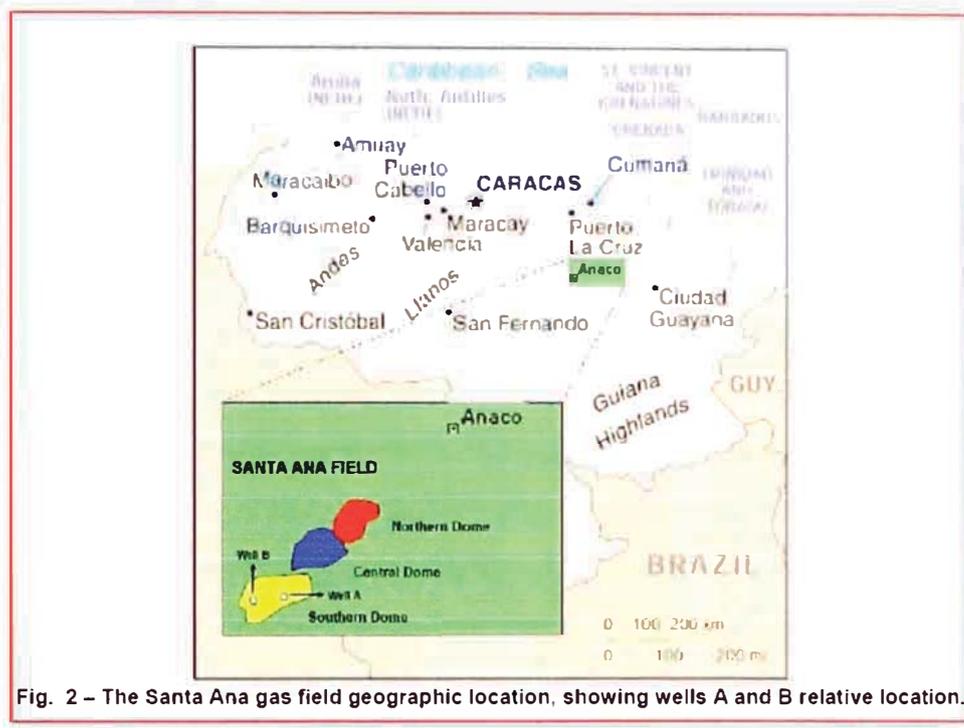


Fig. 2 – The Santa Ana gas field geographic location, showing wells A and B relative location.

El campo ha sido un productor de petróleo desde 1950 y desde el año 2001 este ha sido transformado de un campo marginal de petróleo a una campo maduro de gas de 51 pozos activos con una producción diaria de aproximadamente 95MMscfd. Esto ha sido logrado a través de una campaña agresiva de perforación de 22 pozos y intensas operaciones de servicio de pozos (workover) en los últimos 7 años. El último pozo perforado en este campo antes del 2001 fue en 1985.

El campo está formado por una secuencia de tres domos alineados en la dirección N65E (figura 2) causado por una importante influencia de los esfuerzos compresivos y tensionales que forman los picos y faldas en la estructura.

La aplicación del bajo balance dinámico en el campo de Santa Ana fue realizada en el miembro Colorado de la Formación Oficina (figura 3). Oficina es considerada una de las más prolíferas zonas de gas del campo con reservas de gas de 264 Bcf. Este está formado por una secuencia de capas intercaladas de arena y lutita, donde más de 10 reservorios han sido perforados. Con el miembro Colorado el reservorio objetivo ha sido la arenisca COKL. Este reservorio es caracterizado por

permeabilidades en el rango de 100 y 500 md, porosidades entre 10% y 20%, arenas netas entre 30 y 60 ft y presiones vírgenes entre 1200 y 2200 psi a profundidades entre 6500 y 7500 ft. Los fluidos producidos son gas condensado y gas seco para inyección.

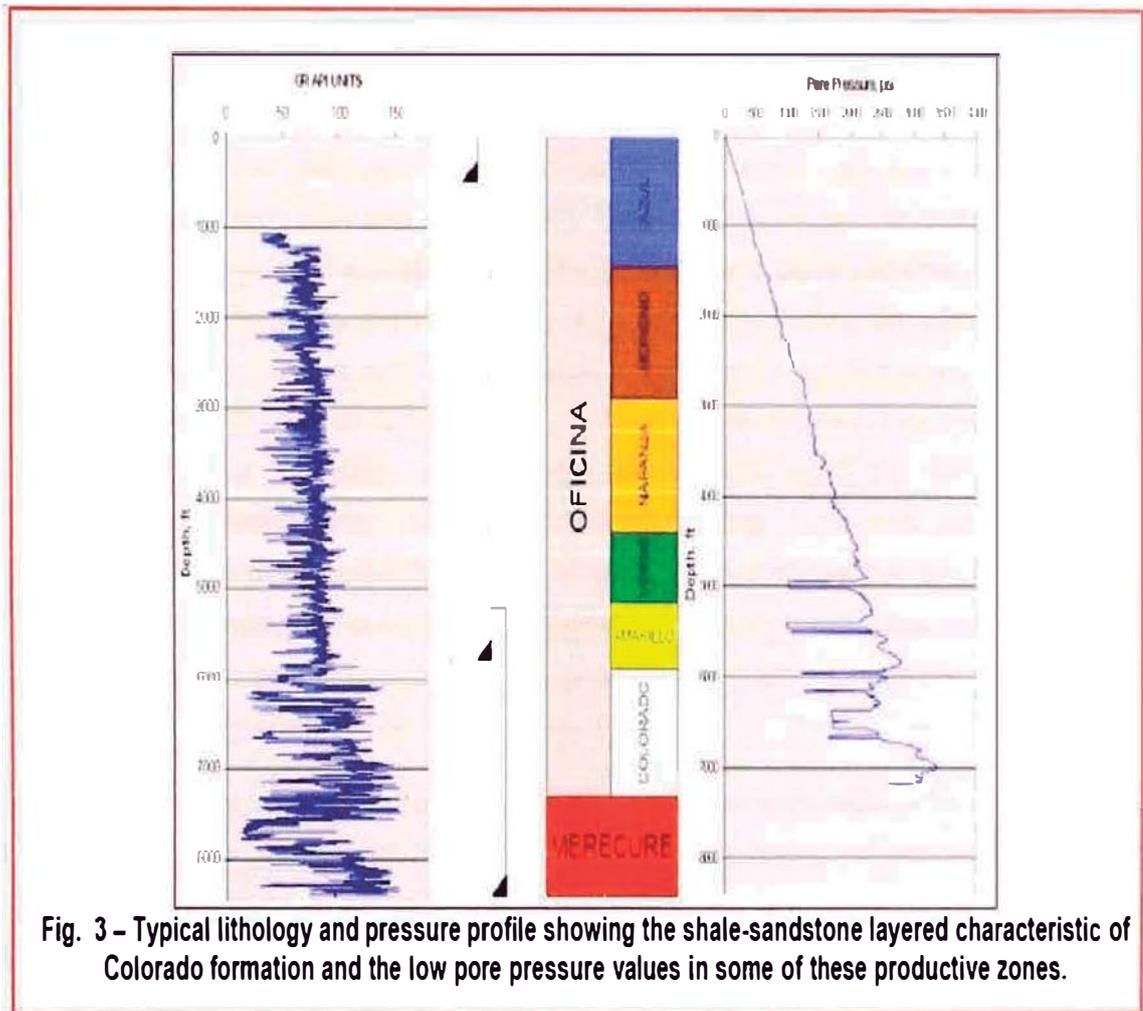


Fig. 3 – Typical lithology and pressure profile showing the shale-sandstone layered characteristic of Colorado formation and the low pore pressure values in some of these productive zones.

Evaluación del Baleo:

La evaluación del baleo en el Distrito de Anaco está completamente documentada en trabajos de investigación previos. La investigación fue objetiva en la evaluación del desempeño del baleo en los nuevos pozos completados después el 2001 cuando la producción de campo cambio de petróleo a gas.

La decisión para confiar solamente en los nuevos pozos fue basado en la disponibilidad y calidad de la data de subsuelo (presión de reservorio, permeabilidad, esfuerzo) obtenido durante la perforación y completación de estos pozos. Aun esta data puede todavía ser sujeta al cuestionamiento, esto fue el único recurso de información disponible para la evaluación del desempeño del pozo. Además, la data fue considerada apropiada por un análisis cuantitativo de una buena cantidad de ejemplos de pozos.

El primer paso fue estimar el performance de las cargas bajo las condiciones del fondo (penetración, diámetro del hueco). Esto fue hecho con la aplicación de un software apropiado que extrapola los datos de la prueba de la penetración de la caga a condiciones de fondo (API RP 43 y API RP 19B). Datos de registros sínicos obtenidos de los nuevos pozos fue usado para estimar los esfuerzos compresivos confinados (USC) para cada una de las principales formaciones. Los valores de USC fueron estimados y están en el rango entre 6000-12000 psi variando con la profundidad y propiedades de roca. Estos resultados junto con los datos de la construcción del pozo (especificaciones el casing, propiedades del cemento, tipos de escopeta, propiedades del fluido, etc.) fueron usados como los datos de entrada para el simulador del baleo. Los valores de penetración fueron estimados entre 6 y 20 pulgadas dependiendo de las condiciones del fondo.

El segundo paso fue evaluar el performance del baleo para estimar la relación de la permeabilidad de la zona triturada vs. La permeabilidad original del reservorio (k_c/k , sus valores están en el rango de 0 a 1), los cuales es una indicación de la calidad y limpieza del perforado. Esta estimación fue hecha por la técnica del análisis NODAL, modelando el desarrollo productivo de cada pozo. Una herramienta comercial fue utilizada para desarrollar este trabajo y simplificar el complejo proceso de cálculo.

Las curvas VLP (Vertical lift performance) para cada pozo fueron construidas basadas en los datos confiables obtenidos: presiones fluyentes en cabeza, datos de tubing y casing, desviaciones y correlaciones multi-fases que fueron machados razonablemente con las gradientes de presiones fluyentes de los datos de campo. Como una consecuencia, las curvas VLP para cada pozo no fueron consideradas como una variable.

Las ecuaciones de estado Pseudo estable para pozos de gas combinado con el modelo de McLeod para skin por baleo fueron usados para construir las curvas IPR. Este enfoque permitió la estimación del pseudoskin por baleo para cada pozo. Además, como las principales variables para estimar el baleo fueron de valor conocido, o asumido, luego la única variable la cual afecto el IPR fue la permeabilidad de la zona triturada (k_c). Las propiedades del reservorio y fluido (presión, espesores, permeabilidad original o virgen, etc.) y los parámetros de baleo (geometría, longitud, densidad y faceamiento) fueron de valor conocido. El radio de la zona dañada fue asumida como 12 pulgadas, un valor el cual parecía razonablemente conservativo. La permeabilidad de la zona dañada (k_d) fue asumida como el 20% de la permeabilidad original o virgen (k), un valor común usado en la industria.

Finalmente, los pozos fueron modelados y k_c fue variando hasta el punto operativo machando los rates de gas obtenidos en la producción inicial oficial de cada pozo. La tabla 1 presenta resultados selectos obtenidos de este ejercicio, donde los valores de k_c/k están todos por debajo de 0.3, el cual es debido a que la zona triturada no ha sido removida. Hay contradicción en algunos de los resultados, como mejores desempeños son esperados basados en penetración y condición hidráulica. Sin embargo, este es una consecuencia de las asunciones previas siendo no reales y/o otras condiciones particulares para cada pozo. Estos resultados debieron ser tratados con cuidado. Los valores estimados de k_c/k no son exactos y ellos son solo usados para determinar la importancia de los factores que contribuyen a todas las completaciones/perdidas de presión por baleo.

Well	k_c/k	"Real" penetration, in	Hydraulic condition	Gun Type
A	0.029	9.64	Underbalanced	3-3/8" Through tubing
B	0.15	6.29	Underbalanced	2-3/8" Through tubing
C	0.285	7.03	Underbalanced	2-3/8" Through tubing
D	0.06	10.07	Underbalanced	3-3/8" Through tubing
E	0.125	10.55	Underbalanced	3-3/8" Through tubing
F	0.05	17.66	Underbalanced	3-3/8" Through tubing
G	0.029	11.83	Overbalanced	4-1/2" Casing gun
H	0.075	9.38	Overbalanced	4-1/2" Casing gun
I	0.037	11.67	Underbalanced	3-3/8" Through tubing
K	0.13	14.47	Overbalanced	4-1/2" Casing gun

Los pozos en el Distrito de Anaco son normalmente baleados, usando técnicas convencionales de bajo balance. Sin embargo, en multizonas selectivas o completaciones con sarta dual las zonas fueron perforadas sobre balanceadas. Adicionalmente, grandes invasiones de filtrado pueden ser esperadas en algunas de las zonas objetivo. Esto es causado por grandes sobre balances en las operaciones de perforación (hasta 3000 psi) en formaciones productivas debido a las grandes diferenciales de presión entre las capas adyacentes. Como un resultado, el performance del baleo fue evaluado cualitativamente pesando el impacto relativo de los resultados de la permeabilidad de la zona triturada contra otros factores relevantes, principalmente pobres performances de las cargas (penetraciones reducidas o cortas) y el radio de la zona dañada. El diagnostico resultante indico que la condición de bajo balance estático y las cargas usadas no fueron suficientes para limpiar efectivamente el túnel o perforado y/o sobrepasar la zona dañada cerca del pozo (wellbore).

Justificación para la Implementación de la Tecnología:

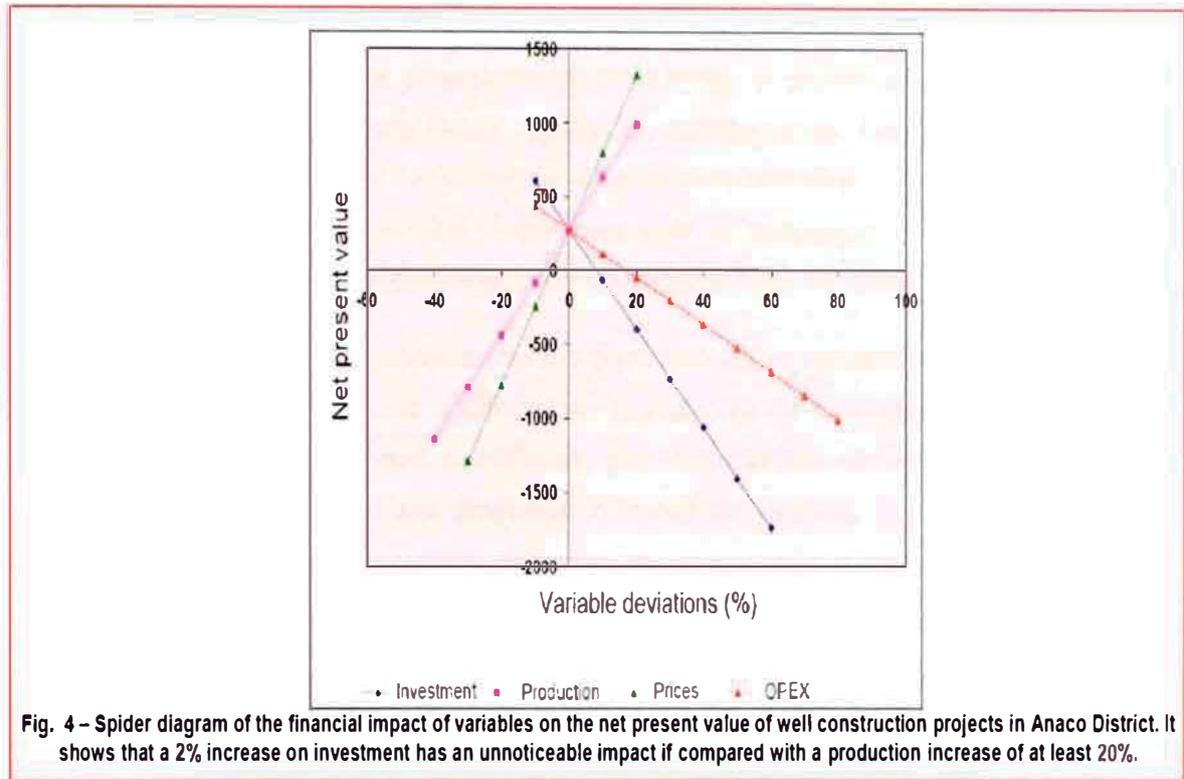
Los resultados de la evaluación de baleo indico que hubo ciertos sitios para mejoramientos en esta área. Un punto de referencia y investigación tecnológica fue conducida para determinar los avances en las técnicas y equipos de baleo. El único desarrollo que se hizo para mejorar la calidad del túnel o perforado fue el baleo bajo balance dinámico. El concepto fue madurando y ganando rápida aceptación en la

industria. Este ha sido aplicado en diferentes locaciones a través del mundo con resultados exitosos. Este fue decido para evaluar sus beneficios para las condiciones en el Distrito de Anaco.

Como un complemento del método de bajo balance dinámico y al mejoramiento de la penetración de las cargas convencionales se desarrollaron nuevos equipos que fueron investigados. En el 2004, nuevas cargas de ultra penetración fueron lanzados, certificado por el API RP 19B de los cuales los resultados indicaron la mejor penetración en el área. La combinación del bajo balance dinámico y las cargas de ultra penetración fueron consideradas como la mejor opción para hacer un cambio en el performance del baleo en el Distrito de Anaco.

Muchas evaluaciones técnicas (simulaciones de baleo y análisis NODAL) fueron desarrolladas para pronosticar y entender el impacto de la implementación de la tecnología. Un análisis cuidadoso fue desarrollado para ilustrar el impacto de las penetraciones más profundas y perforados más limpios, donde la tendencia es cuanto más la relación entre kc/k se acerca a 1 es significado de un a mejor limpieza de los perforados y por ende una mayor productividad ($kc/k \rightarrow 1$). Los resultados evidenciaron un claro potencial para los beneficios de la producción en muchos pozos de referencia, donde el índice de productividad (IP) podría ser duplicado.

Las expectativas técnicas fueron alentadoras; sin embargo, la realidad financiera del negocio en campos maduros no fue muy alentadora debido a las bajas presiones que estos campos tienen por lo tanto era una barrera para sobrepasar, lo cual no involucro que no se pueda aplicar este método de bajo balance dinámico a estos campos maduros. Las técnicas convencionales de bajo costo han sido aplicadas en el Distrito de Anaco por más de 50 años. Las implicaciones de los costos de la tecnología pueden ser hasta 4 veces más que los métodos convencionales. Sin embargo, cuando el impacto adicional financiero fue visto en una perspectiva con el costo total del pozo con solo un 2% de incremento. Finalmente, los impactos de inversión de capital y variaciones en la producción fue analizado. La figura 4 ilustra el efecto del valor neto actual, donde el impacto del 2% en el incremento de gasto de capital tiene un impacto pequeño si se compara con un incremento de la producción de al menos el 20%. El cambio de paradigma y el impacto adicional del gasto de capital fue un impulso para poner en marcha esta tecnología.



Las implicancias técnicas y financieras de la implementación de la tecnología de baleo fueron prometedoras. Sin embargo, hubo todavía la pregunta de en cuanto el mejoramiento podrían mostrar los resultados esperados bajo las condiciones del campo. Fue decidido probar la efectividad de estas tecnologías a través de pruebas de campo de 5 pozos. Los pozos con diversas y complicadas condiciones fueron seleccionados para probar esta tecnología en tantos escenarios como sea posible. Este enfoque dio suficientes oportunidades para sobrepasar las aplicaciones sin éxitos o problemas operacionales en el baleo en estos campos maduros. Dos de los pozos seleccionados para las pruebas de campo están localizados en el campo de Santa Ana y sus casos históricos son revisados en las secciones siguientes de este trabajo. Los tres pozos sobrantes tuvieron problemas operacionales durante el baleo y las pruebas de pozo (well testing) ellos fueron excluidos para este artículo.

La data no relevante podría ser obtenida para evaluar el performance del baleo de la nueva aplicación de esta tecnología.

Diseño del Baleo en Condiciones de Bajo Balance Dinámico:

El principal propósito de esta fase es establecer una identificación de más pozos y zonas candidatos a ser seleccionados para iniciar el proyecto junto con conseguir los mejores escenarios para lograr resultados satisfactorios. Después de conseguir los pozos selectos y reunir los datos de reservorio se utilizo el software para la búsqueda de las mejores herramientas disponibles para la aplicación de este método de bajo balance dinámico y así preparar a los candidatos para su implementación.

Debido a que en la perforación de los pozos se utilizo condiciones de sobre balances para perforarlos (más de 2500 psi en la mayoría de casos) indujo invasiones a la formación muy profundas del filtrado, por lo tanto fue necesario utilizar cargas de penetración profunda para atravesar o bypasear la zona de daño. Con el uso del simulador de baleo muchos sistemas de escopetas y cargas fueron evaluados permitiendo un desarrollo juicioso de cada opción de baleo a ser determinada. El estimado del radio de invasión fue basado en validaciones de datos de prueba completa (pruebas de formación, resonancia magnética, y registros a hueco abierto). Anteriores estudios fueron también analizados junto con artículos de prácticas modernas de baleo y resultados de producción (valores de permeabilidad son requeridos para obtener el daño total y luego determinar el skin por invasión), muchos de ellos no mostraron suficiente penetración para sobrepasar la invasión ocasionada durante la perforación con el uso de cargas convencionales. La figura 5 presenta los datos de reservorio y pozo usados para el diseño del baleo.

Well A zone 1 Information for job design		Well B zone 1 Information for job design	
Interval	6660 ft - 6690 ft	Interval	7138 ft - 7172 ft / 7188 ft - 7204 ft
Pressure	1200 psi	Pressure	2322 psi
Temperature	230 deg F	Temperature	237 deg F
Porosity	20	Porosity	16
Permeability	483 md	Permeability	187 md
UCS	6400 psi - 9000 psi	UCS	6400 psi - 9000 psi
Invasion Radius	15 inch	Invasion Radius	15 inch
Condensate Gas Ratio	60000	Condensate Gas Ratio	65000
Condensate API	40	Condensate API	42

Fig. 5 – Data tables with relevant well and reservoir information used in the perforating design.

Tres sistemas fueron elegidos para la evaluación con el simulador de baleo y un software de análisis NODAL. Estos fueron los siguientes:

- Sistema 1.- sistema de penetración ultra profunda (según al API 19B 59 pulgadas de penetración, 0.43 pulgadas de EH, 38.8 gr de HMX 4 1/2" 72 grados de faseamiento).
- Sistema 2.- la misma carga del sistema 1 pero con un hardware adicional y explosivos para alcanzar el bajo balance dinámico.
- Sistema 3.- sistema de penetración estándar (según API 19B 27 pulgadas de penetración, 0.32 pulgadas de EH, 22.7 gr de HMX 4/58" 135 grados de faseamiento).

Es importante mencionar que el sistema 3 es el convencional usado en este campo y es usualmente baleado sobre balanceado. Finalmente, el sistema 2 fue elegido para las pruebas de campo. Con la selección del sistema de escopeta recientemente definido luego el siguiente paso es tenerlo dentro de la pantalla en el software de bajo balance dinámico. Una consideración que llama la atención es la baja presión de reservorio del pozo A (~1200 psi) el cual es un realmente un inconveniente para

obtener una adecuada condición de bajo balance de presión via un baleo convencional. Mientras un bajo balance estático requirió conseguir remover el daño del baleo (consiguiendo kc/k de 0.3 en el mejor caso) por baleo convencional dicto mas de 2400psi (no alcanzables en la práctica) pero usando la técnica de bajo balance dinámico (DUB) podemos conseguir suficiente diferencial a expensas de un diseño para la sarta TCP para conseguir un DUB (consiguiendo kc/k cercanos a 1). Para el pozo B, sin embargo no hubo problemas operativos referentes a la presión del reservorio porque este tuvo una presión mas alta que el pozo A (~2200 psi).

El resultado de esta simulación del bajo balance dinámico (el numero de cámaras de DUB, espacio entre cargas de DUB, densidad de disparo) es el diseño de carga de escopeta intentando conseguir efectivos bajo balances dinámicos capaces de lograr la completa limpieza de los túneles o perforados. Continuando con la evaluación de los sistemas de escopetas elegidos con el simulador de baleo, nosotros corrimos con el hecho que la baja presión del reservorio (1200 psi) está afectando el mejor escenario del diseño en cada una de las formas que necesita aparecer para bajar la efectividad de la densidad de disparo (2.5 spf) menos que el convencional para un valor por lo tanto que permita al drawdown inmediatamente después que el disparo ocurra. La tabla 2 presenta sumario de los DUB más relevantes. La figura 6 presenta la data de presión precisa obtenida durante el baleo del pozo A bajo condiciones de bajo balance dinámico.

Table 2 – Dynamic underbalance design pressure data.

Parameters	WELL 1	WELL 2
Reservoir Pressure	1200 psi	2322 psi
Firing Pressure	2895 psi	3100 psi
Dynamic Undebalance	900 psi	800 psi
Shot Density	< 5 spf	5 spf
Closed Chamber	Used	Used

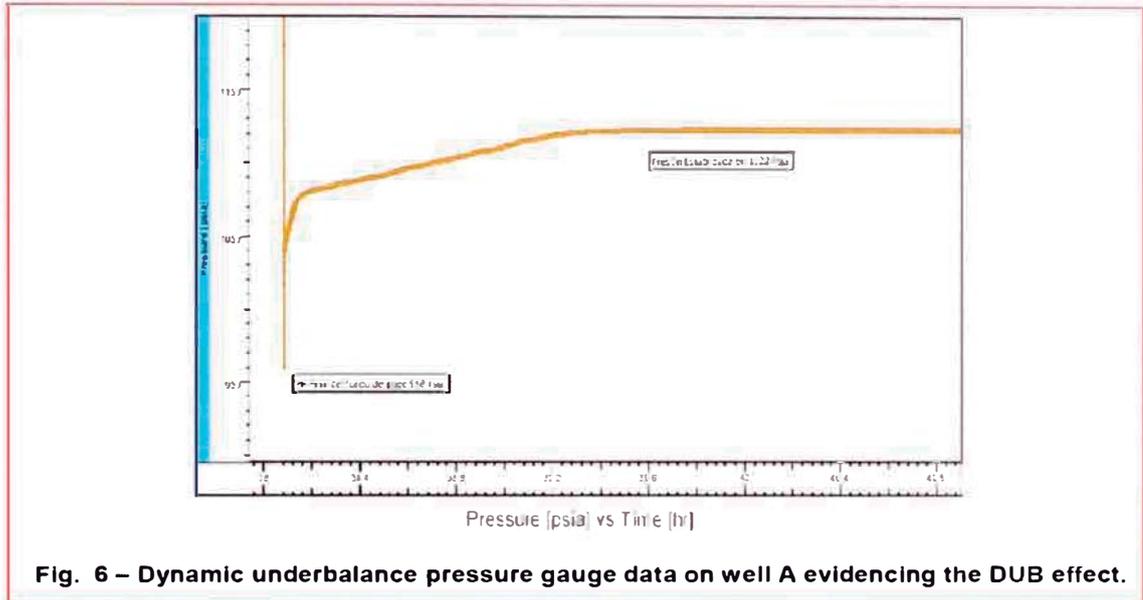


Fig. 6 – Dynamic underbalance pressure gauge data on well A evidencing the DUB effect.

Análisis de los Pozos después del Baleo en Condiciones de Bajo Balance Dinámico:

Después del baleo de los pozos en condiciones de bajo balance dinámico ellos fueron abiertos para fluir en diferentes tamaños de choke. La secuencia de la prueba fue de un flow after flow, en el cual el pozo es producido a estables presiones de fondo a diferentes rates de flujo, seguido por un periodo de build-up. Los fluidos producidos durante la presión transitoria, fueron medidas en superficie usando equipos de prueba portátiles.

Resultados de la prueba del Well A.

Análisis de deliverabilidad.

El análisis de deliverabilidad fue desarrollado usando la metodología típica para pozos de gas conocido como la prueba de back pressure, en el cual la presiones estabilizadas de fondo ($p_i - p_{wf2}$) son ploteadas en una escala log-log versus los rates de flujo en superficie. De este plot el AOF (ABSOLUTE OPEN FLOW POTENTIAL) fue estimado en 45.37 MMscfd. La tabla 3 presenta los rates de flujos del well testing y la figura 7 los flow after flow ploteados para el pozo A.

En adición, los valores del coeficiente de productividad C y el exponente n fueron estimados en 0.998 Mscfd/psi y 0.7641, respectivamente. El valor de n puede variar dese 1 en caso de flujo laminar hasta 0.5 para un flujo totalmente turbulento.

Aun cuando, el diseño de baleo redujo la densidad de disparos a 2.5 spf (50% menos que el estándar 4-1/2 pulgada geometría de la escopeta), los resultados analizados para el exponente n muestra que el flujo patrón alrededor zona cercana al wellbore tuvo un moderado efecto de un flujo no darcy (relativamente bajas velocidades de flujo). Consecuentemente, las pérdidas de presión adicionales causadas por el flujo convergente dentro de los túneles o perforados limpios no causaron un daño a la producción o un drenaje ineficiente en el reservorio.

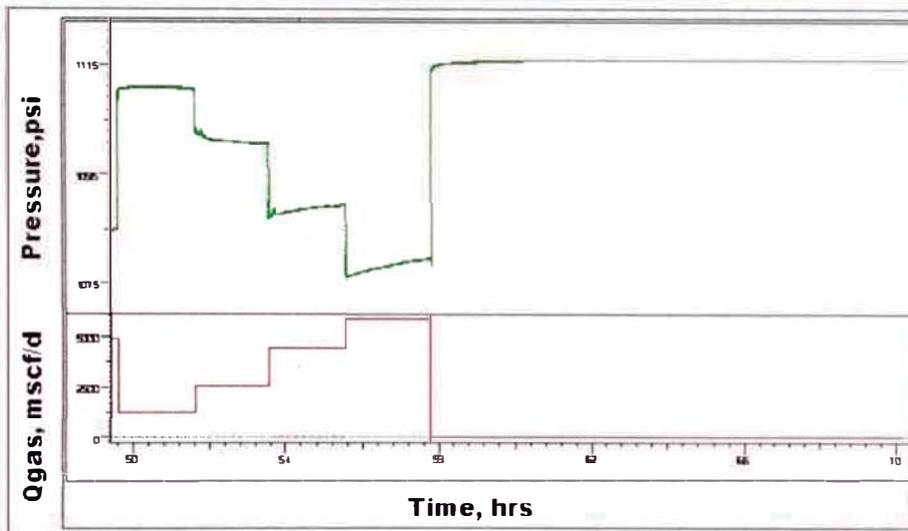


Fig. 7 – Flow after flow test plot for well A showing bottomhole pressure variations during the four point-tests of increasing flow rates periods, as per Table – 3.

Table 3 –Testing flow rate data for well A					
Period	Time, hrs	Event	Qg, MMscfd	Qo, bpd	Qw, bpd
1	03:19	Clean up	---	---	---
2	02:00	Flow Period on ¼" Choke	1.305	---	---
3	02:00	Flow Period on 3/8" Choke.	2.510	70	0.3
4	02:00	Flow Period on ½" Choke.	4.364	60	11.5
5	02:14	Flow Period on Red ¾" Choke.	5.761	67	22
6	12:00	Build up Period	0	0	0

Interpretación:

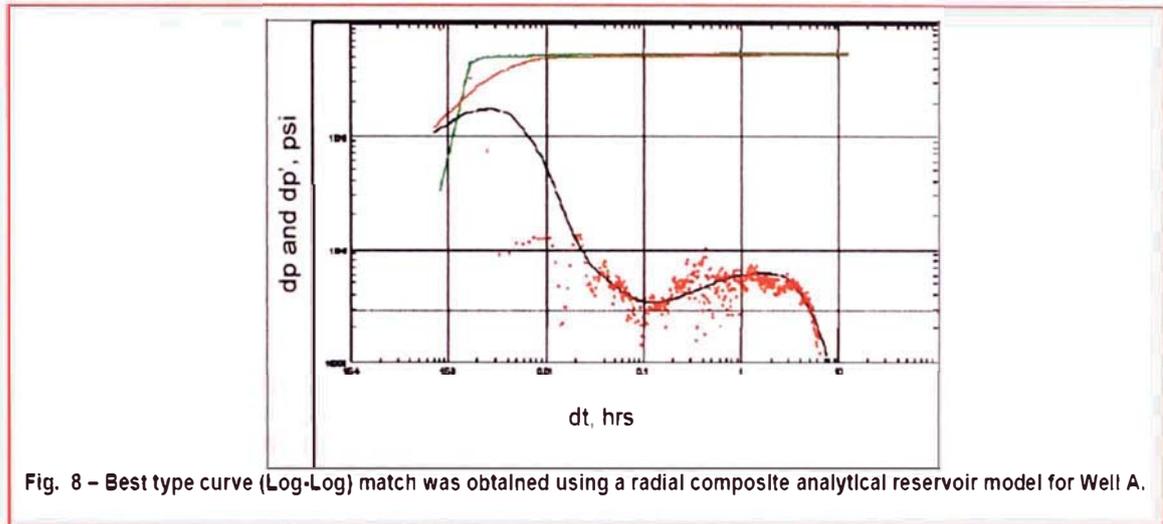
Los métodos de la interpretación de la presión trasiente para este pozo fueron usados basados en la metodología convencional para el análisis de las pruebas del pozo en reservorios de gas condensado. Estos tipos de reservorio muestran un comportamiento complejo atribuido a la presencia de un sistema de doble fluido por así decirlo cuando una vez que la presión cae por debajo del punto de rocío.

Las interpretación de la trasiente del pozo A esta basado principalmente en los datos de build up, porque los datos de drawdown fue afectado por las fluctuaciones de los rates, y en el caso particular de pozos de gas condensado, por el ruido durante la descarga de condesados en la región cercana del wellbore. El diagnostico del plot fue usado para la identificación de la mejor tipo de curva (ploteo log-log) fue obtenido y machado usando un modelo radial.

Aun cuando, el incremento total de presión fue solo de 36 psia, los tiempos de presiones iniciales fue afectada por los efectos de las redistribuciones en el wellbore. Desde 0.01 a 0.1 hrs. La presión tiende a mostrar una pendiente negativa. Esto determina que solo un segmento de la zona perforada o baleada es apta para fluir debido a la penetración parcial o pseudoskin. El tiempo inicial del modelo fue elegido desde el tipo de curva en las asunciones para pozos de entrada restringida, evidenciando la entrada de líquido y gas al banco de arena. Los resultados del tipo de curva machados determino una relación de intervalo abierto/arena neta de 0.15 y un cálculo de skin total debido a los efectos del pseudoskin de 40, este gran skin total obligo a conducir un análisis del sistema para evaluar separadamente las caídas de presiones adicionales debido al pseudoskin por baleo. El principal parámetro sujeto a evaluación fue kc/k . un kc/k de 1 es considerado un skin de cero. El análisis base para alcanzar el valor de kc/k de 1 resulta de un análisis del índice de productividad del pozo. De acuerdo con estos resultados el valor estimado para el pseudoskin fue considerado cero.

El diagnostico del plot, mostrado en la figura 8 presenta un sistema de composición radial con la presión del fondo del pozo por debajo del punto de rocío. Desde 0.1 hasta 0.15 la presión muestra que la primera estabilización o pendiente cero implica un infinite acting de flujo radial (IARF), el cual determina un valor de permeabilidad de

764 md. La presión del reservorio estimada extrapolada de esta zona usando el método de ploteo semi-log fue de 1115 psia. El valor calculado de la conductividad del reservorio fue de 53500 md.ft.



Resultados de la prueba del Well B.

Análisis de deliverabilidad.

Una metodología similar fue aplicada en este caso. Tomando la cantidad de líquido presente en la región cercana al wellbore. La región 4 presenta los datos de well testing y la figura 7 el flow after flow ploteado para el pozo A.

El AOF por extrapolación fue estimada en 129.96 MMscfd.

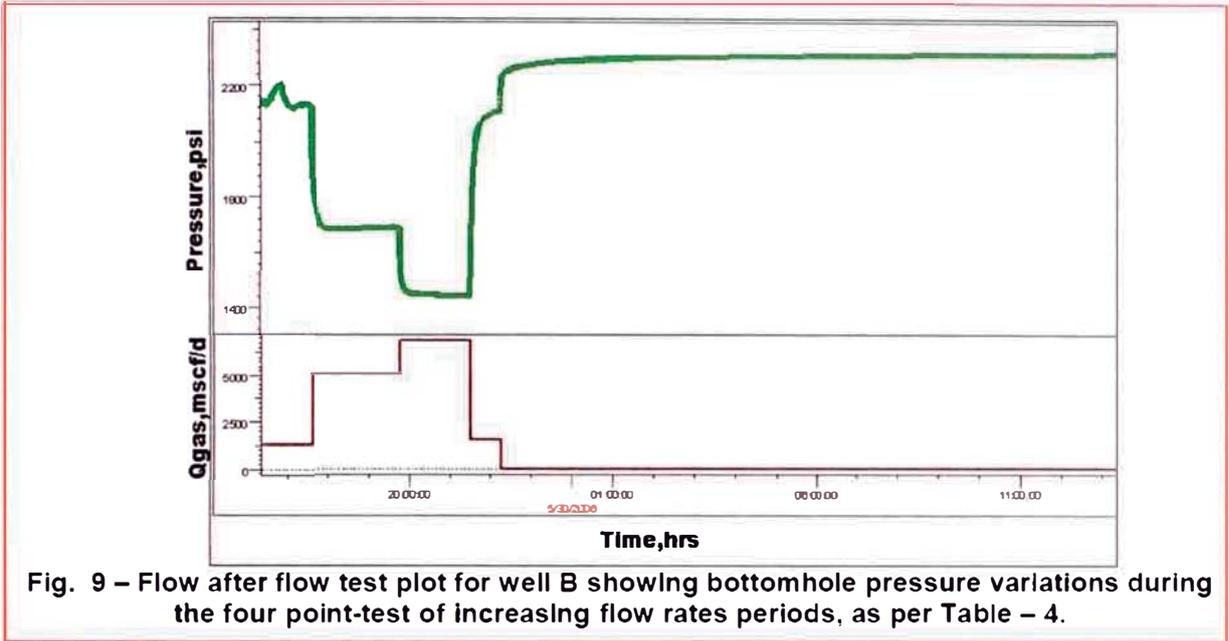


Fig. 9 – Flow after flow test plot for well B showing bottomhole pressure variations during the four point-test of increasing flow rates periods, as per Table – 4.

Period	Event	Qg, MMscfd	Qo, bpd	Qw, bpd
1	Flow Period on ¼" Choke	1.298	---	---
2	Flow Period on ½" Choke.	4.672	561	---
3	Flow Period on ¾" Choke.	6.557	418	-
4	Flow Period on ¼" Choke.	1.518	-	11.5
5	Build up Period	0	0	0

Interpretación:

El mejor tipo de curva para el diagnostico fue obtenido usando un modelo homogéneo. El comportamiento de la presión muestra un efecto lineal o cambios en la difusividad de la formación. Los resultados siguientes fueron establecidos de la exanimación del ploteo log-log mostrado en la figura 10.

- Durante las primeras 0.1 horas de estar cerrada el pozo y después de un corto periodo de almacenaje la presión tendió a mostrar una pendiente negativa, el modelo determino un skin total de -0.7798. la relación de intervalo abierto/arena neta fue de 0.42.

- El régimen de flujo radial es alcanzado después de aproximadamente 0.2 horas y extendida hasta 6 horas. La presión del reservorio estimada de esta zona usando el ploteo semi-log fue de 2326 psia. El valor de la conductividad del reservorio fue de 346 md.ft.

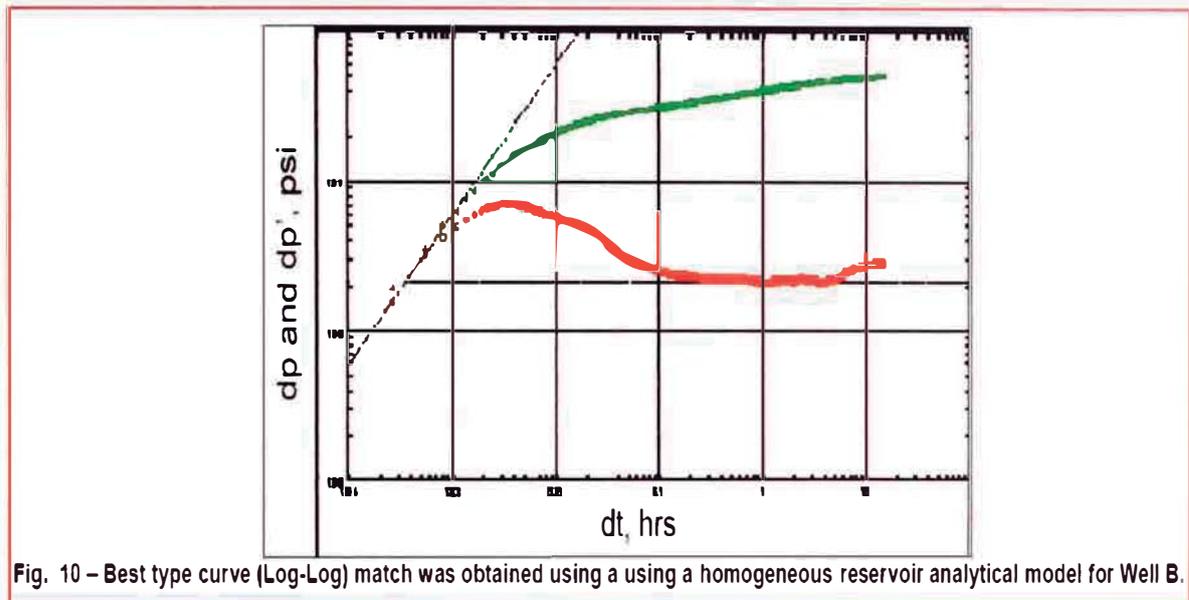


Fig. 10 – Best type curve (Log-Log) match was obtained using a using a homogeneous reservoir analytical model for Well B.

Resultados de Producción:

Las producciones de gas de los pozos A y B fueron oficializadas en 5.4 y 6.6 MMscfd, respectivamente. Estos valores fueron significativamente mayores que los rates esperados para estos pozos (4.2 y 3.5 MMscfd). Aun más, los resultados fueron aun más importantes si se compara con la producción promedio de COKL. Basado en un ejemplo de 10 pozos activos, la producción promedio de gas fue estimada en ~2.2 MMscfd. Los resultados de los pozos A y B representaron más de dos veces el incremento de la producción. Es reconocido que el performance del baleo no es solo el único factor detrás de este resultado. Sin embargo, las pruebas de pozos permitieron entender la gran importancia de la calidad del baleo y la tecnología en el éxito de estas pruebas de campo.

En conclusión se obtienen el siguiente punto:

- La evaluación cualitativa del baleo con limitada y baja calidad de datos es una metodología valorable entender los factores que influyen en el performance del pozo y en el soporte de la tecnología. El baleo bajo balance dinámico ha sido aplicado en un reservorio de baja presión que representa un nuevo logro para esta tecnología en escenarios complicados. Ha sido exitosamente aplicado probado por análisis de pozo y resultados de producción. Una vez más, la calidad del baleo ha probado su impacto y valor en el desempeño del pozo, el cual es algunas veces desestimado y no entendido, especialmente en campos maduros. La mayoría de proyectos han permitido un incremento sustancial de la productividad de los pozos de gas en campos maduros y de baja presión.

9. ANALISIS ECONOMICO

El análisis económico presentado en la presente tesis es un trabajo comparativo entre el servicio de la operación de baleo realizado con un método convencional y con un método de bajo balance dinámico, este último tema de esta tesis.

En las siguientes tablas presentamos detalladamente los cargos por una operación de baleo, el cual pertenece a una re-completación del pozo S-167 del reservorio Hollin.

Método Bajo Balance Dinámico:

<u>SERVICIOS</u>			
CANTIDAD	DESCRIPCION	FRECIO US\$	FRECIO TOTAL US\$
1	CARGO BASICO BALEO EN BAJO BALANCE DINAMICO	4550.00	4550.00
1	CARGO POR EQ. DE PRESION	2300.00	2300.00
320	CARGO ADICIONAL POR KILOMETRAJE A 150 KM POR CAMION DE PERFILAJE, POR CAMIONETA, Y POR CAMION MASTIL.	12.00	3840.00
		SUB - TOTAL US\$	10690.00
<u>PRODUCTOS</u>			
CANTIDAD	DESCRIPCION	FRECIO US\$	FRECIO TOTAL US\$
130	CARGAS POWER JET OMEGA 36" DE FENTRACION	145.30	18889.00
43	CARGAS ESPECIALES FURE	120.00	5160.00
1	MEDIDOR DE PRESIONES	1343.50	1343.50
1	PORTADOR DE CARGAS ESPECIAL	2300.00	2300.00
		SUB - TOTAL US\$	27692.50
		TOTAL US\$	38382.50
<u>TRABAJOS PREVIOS</u>			
		DESCRIPCION	FRECIO TOTAL US\$
		CALCULO DE LOS ESFUERZOS COMPRESIVOS	7050.00
		CALCULO DE LOS RADIOS DE INVASION	6550.00
		COSTO TOTAL	51982.50

El tiempo total de operación para la ejecución del trabajo de baleo fue de aproximadamente 4 horas, a este tiempo se le debe añadir aproximadamente 4 horas más para el armado y desarmado del equipo. El tiempo total empleado en esta operación fue de aproximadamente 8 horas desde que se ingreso a la locación hasta que se salió de la misma.

En este análisis se está tomando como referencia el precio actual del crudo el cual fluctúa entre 35 y 40 dólares actualmente, por lo cual se toma el promedio que es de 37.5 dólares americanos.

Así también por ser un trabajo de re-completacion, el caudal obtenido con este método de bajo balance dinámico fue de 273 Bbl/d.

Es por lo tanto que el servicio del baleo bajo esta condición de bajo balance dinámico, en las condiciones actuales se puede decir que será pagado cuando este haya producido:

$$51982.50 / 37.50 = 1387 \text{ Bbl.}$$

En un tiempo de:

$$1387 / 273 = 5.08 \text{ dias.}$$

Método Convencional:

El pozo S-167 inicialmente fue completado aplicando una operación convencional de baleo mas una operación de limpieza acida a los perforados creados, la cual presento los siguientes parámetros técnicos y económicos.

BALEO

SERVICIOS			
CANTIDAD	DESCRIPCION	PRECIO US\$	PRECIO TOTAL US\$
1	CARGO BASICO BALEO	4550.00	4550.00
1	CARGO POR EQ. DE PRESION	1050	1050
320	CARGO ADICIONAL POR KILOMETRAJE A 150 KM POR CAMION DE PERFILAJE, POR CAMIONETA, Y POR CAMION MASTIL	12	3840
		SUB - TOTAL US\$	9440 00
PRODUCTOS			
CANTIDAD	DESCRIPCION	PRECIO US\$	PRECIO TOTAL US\$
176	CARGAS TITAN 35 " DE PENTRACION	77.60	13657.60
1	PORTADOR DE CARGAS	1127.4	1127.4
		SUB - TOTAL US\$	14785 00
		TOTAL US\$	24225.00

LAVADO ACIDO

SERVICIOS			
CANTIDAD	DESCRIPCION	PRECIO US\$	PRECIO TOTAL US\$
1	CARGO BASICO DE BOMBEO	2780.00	2780.00
1	INSTALACION DE CABEZA INYECTORA	620	620
320	CARGO ADICIONAL POR KILOMETRAJE A 150 KM POR CAMION DE BOMBEO, Y POR CAMIONETA.	5	1600
		SUB - TOTAL US\$	5000.00
PRODUCTOS			
CANTIDAD	DESCRIPCION	PRECIO US\$	PRECIO TOTAL US\$
1	ADITIVOS PARA EL ACIDO	4691.24	4691.24
		SUB - TOTAL US\$	4691.24
		TOTAL US\$	9691.24

Obteniéndose un costo total de:

TRABAJOS	
DESCRIPCION	PRECIO TOTAL US\$
BALEO	24225.00
LAVADO ACIDO	9691.24
COSTO TOTAL	33916.24

Si comparamos igualmente con el caso anterior el tiempo total de operación fue de aproximadamente 9 horas para la operación de baleo, mas 8 horas para el lavado acido a los perforados. Resultando un tiempo bastante largo de operación de aproximadamente 17 horas desde que se entra a la locación hasta que se sale de la misma.

Después de esta operación se obtuvo una producción de petróleo de 150 Bbl/d.

Ocasionando que este pozo se pague, bajo las condiciones actuales del precio del crudo, cuando haya producido:

$$33916.24 / 37.50 = 905 \text{ Bbl.}$$

En un tiempo de:

$$905 / 150 = 6.03 \text{ días.}$$

10. CONCLUSIONES

- La nueva técnica de baleo bajo balance dinámico, puede ser aplicada efectivamente a cualquier reservorio y para un amplio rango de aplicaciones, incluyendo nuevas completaciones, re-completaciones, y para el mejoramiento de la producción.
- El baleo bajo balance dinámico ha sido aplicado en un reservorio de baja presión (Venezuela) que representa un nuevo logro para esta tecnología en escenarios complicados. Ha sido exitosamente aplicado probado por análisis de pozo y resultados de producción. Una vez más, la calidad del baleo ha probado su impacto y valor en el desempeño del pozo, el cual es algunas veces desestimado y no entendido, especialmente en campos maduros. La mayoría de proyectos han permitido un incremento sustancial de la productividad de los pozos de gas en campos maduros y de baja presión con mismos resultados también en los campos de petróleo.
- Esta técnica de baleo bajo balance dinámico se puede aplicar a permeabilidades y presiones bajas obteniendo valores de daño o skins negativos. Este es un revolucionario mejoramiento del concepto de baleo en la historia de la completación de pozos.
- La aplicación de baleo bajo balance dinámico elimina la histórica necesidad de caros tratamientos ácidos o fracturas hidráulicas. A pesar de las condiciones estáticas de sobre balance.

- La aplicación de esta técnica de baleo bajo balance dinámico ayuda a obtener ventas más rápidas de petróleo y gas en mayor cantidad y rapidez que el método convencional y elimina también otros pasos operacionales que son caros, como la acidificación y fracturamiento.
- Con este método se logra en un 100% atravesar o bypassar el daño debido a la invasión de fluido y a la vez remover el daño ocasionado por el baleo logrando un daño de cero (skin cero), la cual se logra de forma efectiva con la técnica de baleo bajo balance efectivo.
- Económicamente, esta técnica reduce los costos de operación ya que se reduce el costo evitando una operación de limpieza de pozo o las operaciones de desplazar o descargar líquidos, que en algunos de los casos toman días en realizarlo ocasionando un coste de equipo de perforación, workover, y otros.
- Económicamente, también se ve incrementada la producción, aumentando así las reservas que por lo tanto se ven reflejadas en ganancias muy significativas. Siendo esta tecnología un poco cara para las operadoras pero que a la larga se ve recuperada en producción, pagando los proyectos en cortos periodos de tiempo.

11. RECOMENDACIONES

- Aplicar a nuestros campos de la selva peruana, las cuales poseen las características necesarias para esta tecnología.
- Aplicar en campos de la selva norte (Pluspetrol) y Litoral Peruano (Petrotech).
- La aplicación de esta tecnología es segura, asegurando así la inversión de las empresas operadoras, que se animen a realizar esta técnica.

12. BIBLIOGRAFIA

- “Perforating”, W.T Bell., R.A. Sukup and S.M. Tariq.
- “A Field Study of Underbalance Pressures Necessary to Obtain Clean Perforations Using Tubing-Conveyed Perforating”, paper SPE 14321.
- “Underbalanced Perforating Design”, paper SPE 19749.
- “Measurement of Additional Skin Resulting from Perforation Damage”, paper SPE 22809.
- “Perforating Skin as a Function of Rock Permeability and Underbalance”, paper SPE 22810.
- “Underbalance Criteria for Minimum Perforation Damage”, paper SPE 30081.
- “Underbalance or Extreme Overbalance”, paper SPE 31083.
- “Borehole Dynamics During Underbalanced Perforating”, paper SPE 38139.
- “Optimum Underbalance for the Removal of Perforation Damage”, paper SPE 63108.
- “Laboratory Experiments Provide New Insights into Underbalanced Perforating”, paper SPE 71642.
- “New Underbalanced Perforating Technique Increases Completion Efficiency and Eliminates Costly Acid Stimulation”, paper SPE 77364.
- “Underbalanced Perforating of Long Reach Horizontal Wells Using Coiled Tubing: Three North Sea Case Histories”, paper SPE 84419.
- “Dynamic Under Balanced Perforating Eliminates Near Wellbore Acid Stimulation in Low-Pressure Weber Formation”, paper SPE 86543.
- “Perforating in Overbalance – Is It Really Sinful?”, paper SPE 82203.
- “Perforating for Zero Skin: A Study of Productivity Improvement in Ecuador”, paper SPE 95859.

- “New Perforating Technique Improves Well Productivity and Operational Efficiency”, paper SPE 101278.
- “Overbalanced Perforating Yields Negative Skin Values in Layered Reservoir”, paper SPE 104099.
- “Quantifying Skin Variation for Underbalanced Perforating”, paper SPE 112432.
- “Dynamic Underbalanced Perforating Application Increases Productivity in the Mature High-Permeability Gas Reservoirs of Santa Ana Field, Venezuela”, paper SPE 112488.