



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**"NUEVOS MODELOS PARA EL ANÁLISIS DEL PISTÓN
VIAJERO"**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A

IVÁN JAVIER TÉLLEZ VELÁZQUEZ

DIRECTOR DE TESIS

M.I. FELIPE DE JESÚS LUCERO ARANDA



MÉXICO, D.F.

CUIDAD UNIVERSITARIA

2012

Índice

	Pag.
Introducción - - - - -	1
Referencias - - - - -	4
Capítulo I. Fundamentos y aplicación del Pistón Viajero - - - - -	5
I.1 Fundamentos - - - - -	6
I.2 Características de flujo multifásico en la tubería de producción- flujo tipo bache - - - - -	8
I.3 Infraestructura del émbolo viajero - - - - -	10
I.4 Ciclo de operación - - - - -	16
I.5 Aplicación del Pistón Viajero - - - - -	20
I.6 Ventajas y desventajas - - - - -	25
Lista de figuras - - - - -	27
Referencias - - - - -	28
Capítulo II. Modelos de análisis del Pistón Viajero - - - - -	29
II.1 Antecedentes – modelos previos - - - - -	30
II.2 Nuevos modelos - - - - -	32
II.2.1 Modelo dinámico - - - - -	32
II.2.2 Modelo dinámico con datos de émbolo inteligente - - -	56
II.2.3 Modelo mecanicista con datos de émbolo inteligente - -	66
II.2.4 Modelo analítico para el método combinado Pistón Viajero – BNI utilizando tubería flexible - - - - -	70
Lista de figuras - - - - -	86
Referencias - - - - -	87
Capítulo III. Ejemplos de aplicaciones del Pistón Viajero - - - - -	89
III.1 Aplicación del modelo dinámico - - - - -	90

III.2 Aplicación del modelo dinámico con datos de émbolo inteligente - - - - -	98
III.3 Aplicación del modelo mecanicista con datos de émbolo inteligente - - - - -	102
III.4 Aplicación del modelo analítico para el método combinado Pistón Viajero-BNI utilizando tubería flexible - - - - -	109
Lista de figuras - - - - -	116
Lista de tablas - - - - -	118
Referencias - - - - -	119
Capítulo IV. Análisis y discusión de los modelos - - - - -	121
IV.1 Análisis del modelo dinámico - - - - -	122
IV.2 Análisis del modelo dinámico con datos de émbolo inteligente- - - - -	127
IV.3 Análisis del modelo mecanicista con datos de émbolo inteligente - - - - -	131
IV.4 Análisis del modelo analítico para el método combinado Pistón Viajero-BNI utilizando tubería flexible - - - - -	134
IV.5 Discusión sobre los resultados de los modelos - - - - -	136
Lista de figuras - - - - -	143
Lista de tablas - - - - -	143
Referencias - - - - -	144
Conclusiones - - - - -	146
Recomendaciones - - - - -	147
Referencias - - - - -	148
Bibliografía - - - - -	146
Apéndice - - - - -	153

Introducción

El émbolo viajero es un método que utiliza un pistón libre, dentro de la tubería de producción, que viaja de manera cíclica, ascendente y descendientemente, produciendo líquido en cada una de sus carreras ascendentes.

Este método de levantamiento es comúnmente clasificado como un sistema artificial de producción (SAP) para ser comparado con ellos, aunque en realidad este método no presenta más que una forma de realizar de manera más eficiente la producción de los fluidos del pozo. Así, ya que el émbolo viajero por sí mismo no suministra energía adicional a los fluidos producidos por el yacimiento, no puede ser clasificado como un SAP.¹

No obstante, este método tiene la flexibilidad de funcionar como un medio temporal para mantener un pozo fluyendo previo a la implementación de un SAP o incluso combinarse con un SAP, como en el caso del bombeo neumático (BN), en lo que se conoce como versión asistida del émbolo viajero, que podría verse también como una variante del BN en la que el émbolo mejora el patrón de flujo durante la producción generando una interface sólida entre el líquido y el gas, que permite minimizar el resbalamiento de líquido. En este caso, sí podría considerarse como un SAP dada la inyección de gas a presión.

El pistón viajero es un método muy eficiente cuando es aplicado en las condiciones óptimas. Dentro de sus aplicaciones más comunes se encuentran: mantener la producción de pozos de aceite con altas relaciones gas-líquido (RGL), descargar pozos productores de gas con problemas de carga de líquidos y reducir el resbalamiento de líquidos en pozos con bombeo neumático. Además, ya sea en pozos de aceite o de gas, ayuda a mantener limpia la tubería de producción en pozos con problemas de incrustaciones (depositación de parafinas, asfaltenos, etc.).^{2,3}

La necesidad de implementar un sistema como el émbolo viajero es común a sus tres aplicaciones principales y surge de una problemática que tarde o temprano aqueja a todo yacimiento: la pérdida de presión.

Conforme un yacimiento de aceite pierde presión comienza a producir una cantidad creciente de gas, aumentando la RGL hasta llegar al punto en que se desperdicia la energía del yacimiento que debería ser utilizada para llevar los líquidos hasta la superficie. En estos casos, se implementa el émbolo viajero para crear una interface sólida que permita arrastrar los líquidos del pozo en la carrera

¹ Referencias al final de la introducción o de cada capítulo.

ascendente disminuyendo así la RGL por un incremento en la producción de líquido, más que por una disminución en la producción de gas.^{2,4}

Cuando un yacimiento que produce gas pierde presión, pierde también la facultad para elevar los líquidos asociados hasta la superficie, provocando que éstos se acumulen en la parte inferior del pozo. Esto genera una contrapresión en el yacimiento y, si no es controlado a tiempo, la columna de líquidos puede generar una presión hidrostática equivalente a la presión del yacimiento matando el pozo, es decir, impidiendo el flujo. Para evitar lo anterior, se implementa el pistón viajero con la función principal de descargar la columna de líquidos, acumulados en el fondo del pozo, en forma de bache.^{5,6}

El BN es un SAP que utiliza la inyección de gas a presión por el espacio anular para mezclarlo con los fluidos producidos y proveerles de energía suficiente para llegar hasta la superficie. En numerosas ocasiones, el gas inyectado al entrar en la tubería de producción (TP) tiende a adquirir una forma de bala, acorde al perfil de velocidad y penetrar el volumen de líquido que se encuentra en la parte superior. En este caso, el émbolo viajero crea una interface mecánica entre el gas y el líquido y funciona como sello eliminando la penetración del gas en el líquido, mejorando así la eficiencia de flujo convirtiendo al pistón viajero en una aplicación más eficiente de producción intermitente.

El émbolo viajero, en su versión convencional, emplea la energía natural del yacimiento para mejorar la eficiencia de flujo mediante la adición de un pistón libre que viaja de manera cíclica en la TP. El ciclo se puede dividir en tres etapas: la carrera ascendente, la carrera descendente y al aumento de presión del sistema. La carrera ascendente comienza con la apertura de la válvula motora y culmina con la llegada del émbolo a la superficie. Durante esta etapa se realiza la producción de líquidos. El pistón y el bache de líquido sobre él suben por la TP impulsados por la expansión del gas acumulado en el espacio anular. La carrera descendente comienza con la liberación del émbolo, momento en que se da el inicio de la caída y culmina con su llegada al resorte de fondo ubicado al final de la TP. Finalmente, el periodo de incremento de presión es aquel durante el cual la válvula motora se encuentra cerrada permitiendo así que la producción del yacimiento se acumule en el pozo, el gas en la parte superior y el líquido en la parte inferior, hasta alcanzar una presión determinada que abrirá la válvula motora provocando un decremento de presión y forzando así que el ciclo comience de nuevo.^{2,4}

Ya sea mediante el mejoramiento de la eficiencia de flujo, la descarga de los líquidos acumulados en el fondo del pozo o manteniendo la tubería de producción libre de acumulación de incrustaciones, el pistón viajero representa una opción atractiva dado su bajo costo y su eficiencia. Es por eso que el objetivo de esta tesis

es presentar un análisis de los nuevos modelos disponibles en el dominio público para el análisis del émbolo viajero y resaltar dentro de sus características principales, sus cualidades y limitaciones.

Es así que se eligieron cinco de los más recientes modelos, publicados en los últimos cinco años, caracterizados por incluir enfoques novedosos como el uso de datos tomados en tiempo real por un pistón inteligente capaz de medir presiones y temperaturas con una frecuencia de hasta un segundo y descargar los datos recabados cada vez que el pistón se encuentra en superficie. Otra novedad es un modelo que describe una variante del método combinado Pistón Viajero-Bombeo Neumático Intermitente en la que se introduce una tubería flexible (TF) en el interior de la tubería de producción y se inyecta el gas a presión por el espacio anular TP-TF para desplazar el pistón colocado dentro de la tubería flexible.

Posteriormente se muestran aplicaciones hechas en China y EUA de los modelos propuestos y se analizan los resultados de cada uno de ellos, así como sus aciertos y desaciertos para obtener conclusiones generales acerca del método y particulares de cada uno de los modelos, realizar algunas recomendaciones para su implementación y algunas otras para futuras mejoras.

Referencias

1. CLEGG, J. D.; HEIN, N. W. y BUCARAM, S. M. *Author's Reply to Discussion of Recommendations and Comparisons for Selecting Artificial-Lift Methods*. SPE 29092, 1994.
2. ABERCROMBIE, B. "Plunger Lift", *The technology of artificial lift methods*. Volumen 4, BROWN, K. E. (ed.), 1984.
3. NARVAEZ, C. y FERRER, A. *Prevention of Paraffin Well Plugging by Plunger-Lift Use*. SPE 21640, 1991.
4. LUCERO ARANDA, F. J. *Análisis Dinámico del Pistón Viajero*, tesis de licenciatura. México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 1985.
5. LEA, J. F. y TIGHE, R. E. "Gas well loading", *The technology of artificial lift methods*. Volumen 2b, BROWN, K. E (ed.), 1980.
6. LUCERO ARANDA, F. J. *Manejo de pozos de gas*, Apuntes de Sistemas Artificiales de Producción, Tema VII. 2011.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS Y APLICACIÓN DEL PISTÓN VIAJERO



I.1 Fundamentos

También conocido como émbolo viajero, este sistema de producción es utilizado para mejorar el flujo tanto en pozos de aceite como en pozos de gas. En pozos de aceite se usa cuando se tiene una cantidad creciente de gas que llega al punto en que el gas fluye con mayor facilidad que el aceite dificultando la producción del líquido. En pozos de gas es utilizado cuando se tienen problemas de carga de líquidos en los que una acumulación de líquido en el fondo del pozo crea una contrapresión que dificulta la producción del gas. El sistema utiliza un pistón libre dentro de la tubería de producción que viaja de manera cíclica ascendente y descendente, produciendo líquido en cada una de sus carreras ascendentes.

Los componentes principales del émbolo viajero son: un resorte de fondo colocado a la mayor profundidad posible en la tubería de producción, un émbolo o pistón, un lubricador superficial, una válvula motora que permite controlar la producción del pozo y un controlador computarizado que realiza la apertura y el cierre de la válvula.

Para poder implementar este sistema es necesario que exista comunicación entre el espacio anular y la tubería de producción. El arreglo más común es un aparejo de producción sin empacador como se muestra en la *figura 1.1*, aunque este arreglo puede modificarse dependiendo de las condiciones específicas de cada pozo.

El ciclo del émbolo viajero se divide en tres etapas principales: la carrera ascendente, la carrera descendente y el incremento de presión del sistema.

La carrera ascendente comienza con la apertura de la válvula motora, esto permite que la diferencia de presiones entre el espacio anular y el interior de la tubería de producción se incremente, provocando que el émbolo sea impulsado hacia la superficie. A su vez, éste impulsa un bache de líquido; el émbolo es recibido en la superficie por un elemento llamado lubricador tras haber producido el bache. En ese momento la presión en el espacio anular disminuye y la válvula motora se cierra.

En este punto comienza la carrera

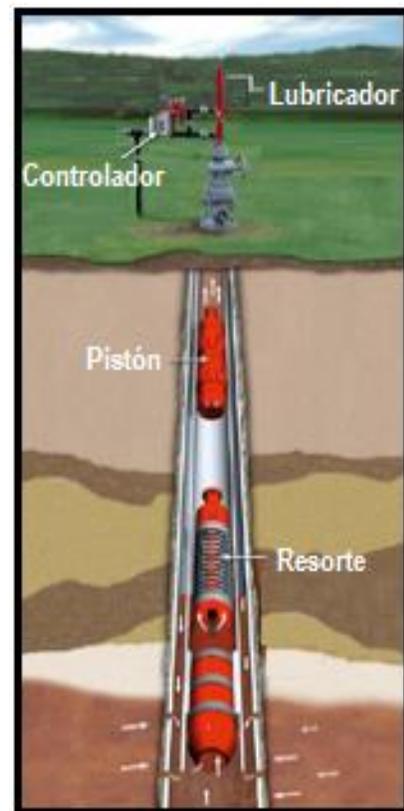


Figura 1.1 Esquema de instalación del pistón viajero

descendente; el émbolo se suelta del lubricador y baja en caída libre por la tubería de producción hasta el resorte de fondo que amortigua su llegada.

Finalmente, se presenta el incremento de presión del sistema. Con el émbolo descansando en el fondo de la tubería de producción, los fluidos de la formación se abren paso hasta al pozo, gracias al decremento en la presión, y el líquido se acumula hasta un nivel por encima del émbolo, formando así el nuevo bache, mientras que el gas se acumula en el espacio anular incrementando la presión del sistema. Cuando la presión superficial de la tubería de revestimiento alcanza un cierto valor predeterminado, la válvula motora se abre volviendo a comenzar el ciclo.

Utilizado principalmente en pozos con altas relaciones gas-líquido (RGL) y bajos gastos (<200 barriles de fluido por día (bfpd) a 10,000 pies)¹, cuya producción es caracterizada como patrón de flujo tipo bache, el pistón viajero consiste en colocar una interface mecánica entre el bache de líquido producido y el gas que sirve de impulsor. Esto se realiza con el fin de minimizar las pérdidas de líquido por el fenómeno de resbalamiento que se presenta debido a la forma de bala que adquiere el gas en la punta, fenómeno por el cual se llega a perder hasta un 75% del total del bache de líquido en su viaje desde el fondo del pozo hasta la superficie.

La *figura 1.2* muestra las versiones disponibles del émbolo viajero. En su versión autónoma, éste aprovecha la energía propia del yacimiento y usa el mismo gas que produce la formación para propiciar la producción de hidrocarburos en forma de baches de líquido de manera cíclica en un flujo intermitente. Cuando la energía propia del yacimiento no es suficiente para elevar el bache de líquido hasta la superficie, el émbolo viajero, en su versión asistida, utiliza una fuente de energía externa (generalmente inyección de gas a presión por el espacio anular) para elevar los fluidos de manera intermitente. Dicha versión asistida es comúnmente conocida como una combinación de bombeo neumático y émbolo viajero.²



Figura 1.2 Versiones del pistón viajero

El principal mecanismo de producción asociado a este tipo de levantamiento es la expansión del gas acumulado en el espacio comprendido entre el exterior de la tubería de producción (TP) y el interior de la tubería de revestimiento (TR), área mejor conocida como espacio anular (EA). La ventaja de este método consiste en el mejoramiento de flujo que proporciona el émbolo al funcionar como una interface sólida entre el líquido y el gas, logrando minimizar casi hasta cero las pérdidas por el fenómeno conocido como resbalamiento del líquido.

I.2 Características de flujo multifásico en la tubería de producción-flujo tipo bache

En la tubería de producción se da el flujo desde el fondo del pozo hasta la superficie. A continuación se analiza el caso en el que se presenta un flujo vertical. De acuerdo a la relación gas-líquido (RGL) de los fluidos producidos, se distinguen cuatro patrones distintos de flujo multifásico, mismos que se muestran en la *figura 1.3*, burbuja, bache, anular y niebla. El flujo tipo burbuja es el que presenta menor volumen de gas y por lo tanto menor RGL, seguido del tipo bache, el anular y finalmente el tipo niebla que presenta el mayor volumen de gas.

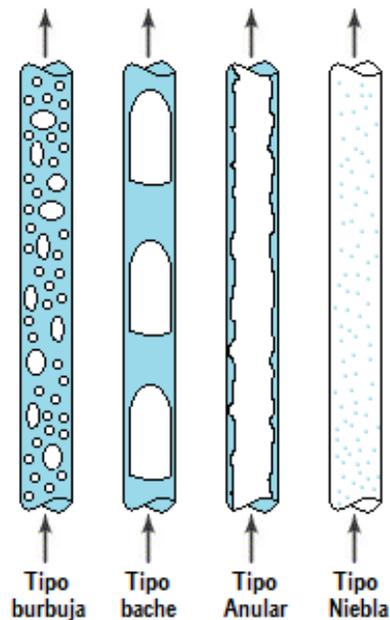


Figura 1.3 Patrones de flujo en tuberías verticales

En el flujo tipo bache se producen intermitentemente gas y líquido. Este tipo de flujo se presenta cuando el pozo ha perdido la capacidad de producir líquidos de manera continua. La mezcla de fluidos llega a un punto en el que la cantidad de gas es tal que las burbujas comienzan a colisionar, formando burbujas lo

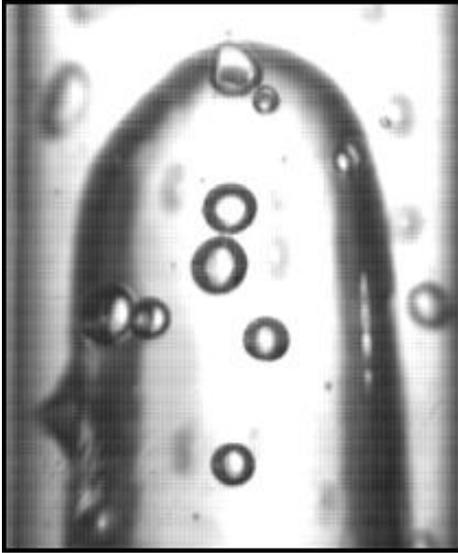


Figura 1.4 Flujo tipo bache

suficientemente grandes para abarcar prácticamente la totalidad del área transversal interna de la tubería de producción; esto es, el diámetro de las burbujas casi iguala al diámetro de la TP. Así, se desplaza un volumen de líquido por encima de las burbujas llamado bache. Esto es resultado de una burbuja de gas a presión que trata de llegar a la superficie debido a la diferencia de presión existente entre el fondo del pozo y la superficie. La burbuja de gas va aumentando su tamaño mientras asciende debido a la expansión del gas conforme las condiciones de presión cambian a lo largo de la TP. Cabe mencionar que la fase líquida sigue siendo la fase continua, aunque la fase gaseosa puede ser más significativa.

Mientras la burbuja de gas asciende por la tubería de producción empujando al bache de líquido, se presenta un fenómeno llamado resbalamiento del líquido debido a la diferencia entre las velocidades de ambas fases. Los mecanismos involucrados en el resbalamiento son: la resistencia al flujo por fricción, la diferencia de compresibilidad y la segregación gravitacional. Esto provoca que la burbuja de gas tienda a ocupar el centro de la tubería y se forme una película de líquido que está en contacto directo con la tubería y alrededor de la burbuja como se muestra en la *figura 1.4*. La velocidad del gas tiende a ser mayor que la del líquido que rodea la burbuja y ésta trata de abrirse paso a través del líquido, haciendo que la película de líquido alrededor de la burbuja viaje en dirección descendente a velocidades bajas mientras la burbuja asciende. Este fenómeno se debe a que cuando el gas asciende se produce un esfuerzo cortante que se traduce en una fuerza en dirección contraria sobre la columna de líquido, forzándolo así a descender.

Dado que la velocidad de flujo es mayor en el centro de la tubería, como lo muestra el perfil de velocidad en la *figura 1.5*, el gas (cuya resistencia al flujo es menor) ocupa este espacio y la burbuja de gas toma una forma afilada al centro, de acuerdo al perfil de velocidades, en lo que se conoce como burbuja de

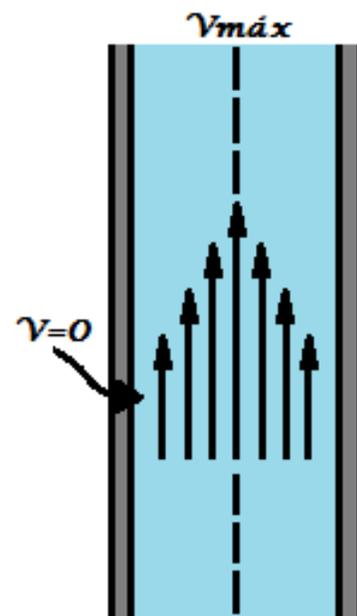


Figura 1.5 Perfil de velocidades en una tubería vertical

Taylor, propiciando así que más líquido sea dejado atrás. Esto significa que sólo una parte del volumen inicial de líquido se recupera en superficie mientras que el resto, que es dejado atrás, cae hasta el fondo del pozo ayudando a formar el próximo bache. Esto puede generar pérdidas de hasta un 75% del volumen original del bache por el fenómeno de resbalamiento del líquido.

I.3 Infraestructura del émbolo viajero

El émbolo o pistón viajero cuenta con un equipo superficial y un equipo subsuperficial. La *figura 1.6* muestra sus elementos principales, aunque dependiendo de las características especiales de cada pozo, puede ser que existan variaciones o elementos extra.

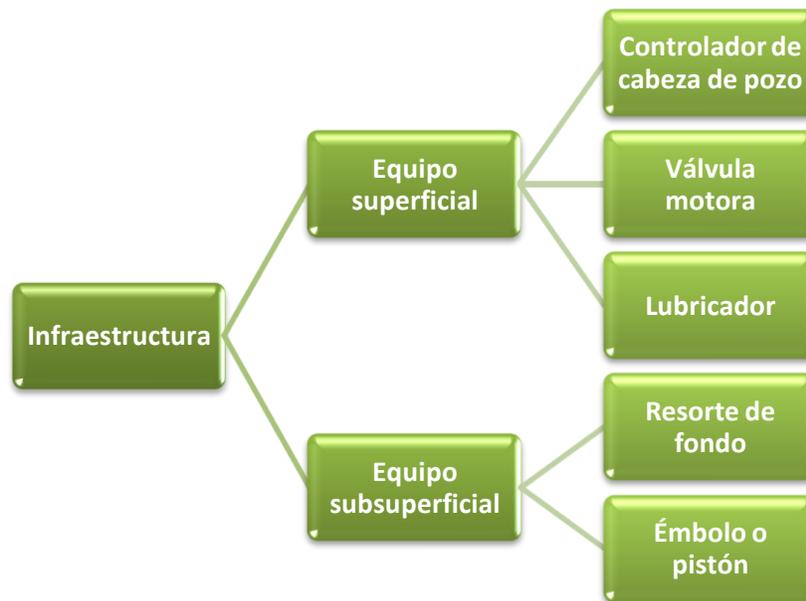


Figura 1.6 Infraestructura del pistón viajero

Equipo superficial

Controlador de cabeza de pozo

Equipo computarizado, generalmente electrónico, cuya función es controlar la apertura y cierre de la válvula motora con el fin de realizar de la manera más eficiente el ciclo del pistón, ya sea para maximizar la producción de líquidos, minimizar la producción de gas, maximizar la producción de gas o realizar un determinado número de ciclos diarios. El control de la válvula estará predeterminado en función de tiempos, presiones o combinaciones de ellos,



Figura 1.7 Controlador superficial

Programar intervalos de tiempo o un sistema digital que permita mandar señales a la válvula motora accionada por un sistema neumático. El control por tiempo se utiliza principalmente en pozos que requieren un largo periodo de producción, por ejemplo, pozos con altas RGL. En éstos, la cantidad de gas es mayor a la cantidad requerida para levantar los fluidos a la superficie, por lo que se necesita un periodo de producción de gas después de que el pistón llega al lubricador para desfogar un volumen extra de gas. En estas circunstancias es recomendable instalar un sensor de arribo del pistón a la superficie.

Existen diversas variaciones en el sistema que controla el sensor de arribo del pistón, pero generalmente se utilizan señales de presión diferencial, señales magnéticas o señales mecánicas para cerciorarse de que el pistón llegó a la superficie.

El controlador de presión suele utilizarse en pozos cuya cantidad de gas no excede la cantidad de gas requerida para realizar el levantamiento de los líquidos y para pozos de aceite con alto índice de productividad aunque tengan una RGL mayor a la requerida. El controlador de presión permite minimizar la producción de gas, con lo que se puede utilizar el gas disponible de la manera más eficiente para levantar los fluidos. Otra manera de contribuir a aprovechar el gas de la manera más eficiente es incorporar un sistema que cierre la válvula de control en cuanto el émbolo llegue a la superficie, para así evitar un periodo de producción de gas tras la producción del bache de líquido.

Los controladores de presión pueden ajustarse fácilmente a valores de apertura y de cierre de la válvula, de acuerdo con la presión que se tenga en superficie de la tubería de revestimiento, o bien del espacio anular o, en su defecto, a una diferencial de presión.

aunque puede responder también a señales de sensores de nivel de líquido y arribo del pistón a la superficie, entre otras. La *figura 1.7* muestra un controlador superficial electrónico que tiene una pantalla digital. Éste es fácilmente programable. Estas unidades se conectan con el controlador de presiones y de tiempo para lograr un mejor desempeño.

Para controlar el tiempo es necesario un reloj de cuerda mecánica acoplado a un disco que permita

Válvula motora

Dispositivo mecánico colocado en la tubería de descarga y diseñado con el fin de regular, permitir o impedir el flujo a lo largo de la tubería, de acuerdo a las necesidades del operador. Su operación neumática permite controlar la producción. Un ejemplo se tiene en la *figura 1.8* que muestra una válvula de alta presión MFC HP® que permite presiones de operación de hasta 4,000 lb/pg².



Figura 1.8 Válvula motora



Lubricador

Es un elemento esencial situado en la cima del árbol de válvulas cuya función principal es amortiguar la llegada del émbolo a la superficie; además, en un costado puede acoplársele un dispositivo de detección que genera una señal cuando recibe al pistón y que permite retenerlo en superficie en caso de que se necesite prolongar el flujo de gas tras su llegada, inspeccionarlo, cambiarlo o cualquier otra necesidad de la operación. La *figura 1.9* muestra un lubricador, uno normal soporta presiones de trabajo de aproximadamente 2,000 lb/pg², pero existen lubricadores de alta presión que soportan hasta 3,500 lb/pg².

**Figura 1.9
Lubricador**

Equipo subsuperficial

Resorte de fondo

Elemento colocado en el fondo de la tubería de producción cuya función es amortiguar la llegada del émbolo al fondo del pozo. La *figura 1.10* muestra un resorte de fondo convencional. Este resorte requiere de un aditamento retenedor que le permita permanecer en el lugar que le corresponde. Dicho retenedor servirá de elemento de anclaje al resorte de fondo, pero también es necesario cuando se requiere una válvula de pie. La válvula de pie es útil cuando es indispensable que el líquido no pueda fluir del interior de la TP hacia la parte inferior; es una válvula de flujo en un solo sentido. Cabe mencionar que cuando el émbolo cae hasta el fondo de la TP y éste se encuentra seco, debe usarse un elemento retenedor independiente para el resorte de fondo y la válvula de pie, ya que el émbolo llega con tal velocidad que golpea al resorte lo suficientemente fuerte como para perjudicar la válvula de pie, provocando un mal funcionamiento. Todos estos elementos alojados dentro de la TP pueden ser recuperados con línea de acero.



Figura 1.10
Resorte de fondo

Émbolo



Figura 1.11
Pistón

Dispositivo, generalmente metálico, cuya función principal es crear una interface mecánica entre el bache de líquido que desea producirse y el gas impulsor para incrementar la eficiencia de levantamiento de líquidos en una producción bifásica. Dicha interface sólida hace la función de un pistón que viaja libremente durante la carrera ascendente y descendente, produciendo líquidos durante su carrera ascendente. La *figura 1.11* muestra un pistón convencional.

Existen distintos tipos de émbolo, pero todos ellos deben contar con tres características comunes: (1) deben tener una alta capacidad para repetir el ciclo productivo sin dañarse o demeritar su funcionamiento, (2) deben ser resistentes a altos y continuos impactos y (3) deben crear un sello sin llegar a pegarse en las paredes de la TP.

En la industria se han desarrollado pistones cada vez más complejos, pero todos trabajan bajo el mismo principio y sus

variaciones están en función de la eficiencia de su sello, su peso y su capacidad para viajar en contra del flujo. Los más modernos que ha creado el desarrollo tecnológico son capaces de tomar datos de presión y temperatura, almacenarlos y transmitirlos a una computadora mientras el émbolo se encuentra en la superficie.

Los émbolos se pueden clasificar de acuerdo a sus características por contar o no con válvula de paso, o bien, de acuerdo al tipo de sello.

- Por contar o no con válvula de paso se clasifican en:

Sólido. Éste es un émbolo convencional completamente macizo por lo que tiene la ventaja de ser más resistente a los impactos. Es utilizado satisfactoriamente en pozos de flujo intermitente, es decir, en los que el flujo permanece interrumpido por periodos lo suficientemente largos para que el émbolo realice la carrera descendente.

De alta velocidad. Éste cuenta con espacio libre en el centro del pistón en el que se encuentra una válvula de paso que se abre al llegar al lubricador y se cierra al llegar al resorte de fondo. Éste hueco en el centro le permite al émbolo realizar la carrera descendente a mayor velocidad y, en algunos casos, dependiendo del diseño, le permite realizar la carrera descendente en contra del flujo de gas o de aceite con el fin de incrementar el número de ciclos. Una desventaja que presentan estos modelos es que son menos resistentes a los impactos a alta velocidad ya que pueden dañar la válvula de paso.

- De acuerdo al tipo de sello, se tiene la siguiente clasificación:

Émbolo con sello turbulento. Consta de una serie de canales; cuando el gas trata de pasar por el espacio comprendido entre el émbolo y la TP, es forzado a pasar por dichos canales con un movimiento rápido que genera turbulencia dentro del canal y evita el flujo a mayor velocidad del gas. Algunos tipos de émbolo con sello turbulento son los de espiral y los de brocha; éstos últimos en ocasiones son utilizados cuando se presentan sólidos en la TP.

Émbolo tipo lavadora. Consta de una serie de anillos que sobresalen del diámetro nominal del émbolo y que son ligeramente menores al diámetro de la TP. Dichos anillos son presionados por resortes excéntricos contra la TP, formando un sello continuo, producto de una serie de canales que generan un sello turbulento similar al descrito anteriormente. Una ventaja que presenta este tipo de pistón es que por su continuo contacto con las paredes de la TP remueve parafinas y acumulaciones no deseadas. Además, tiene una variante en la que el resorte de fondo viene acoplado a la parte inferior del pistón y amortigua la llegada al fondo cuando el resorte se impacta con el niple de asiento. Ésta variante tiene la ventaja de que el

émbolo puede ser extraído en superficie dejando libre la TP para cualquier operación. No obstante, tiene la desventaja de ser un émbolo más pesado y que genera mayor fricción.

Émbolo con hojas de expansión. También llamado émbolo con almohadillas o almohadillas expandibles, este pistón está compuesto por una serie de hojas de acero inoxidable en la parte media del émbolo. Dichas hojas tienen unos resortes que les permiten expandirse para generar un sello con la TP durante la carrera ascendente. El émbolo está compuesto por un mecanismo que le permite retraer las almohadillas al llegar al lubricador, realizar una carrera descendente más rápida y evitar adherencia con la TP. Existe una variante que presenta doble almohadilla para un mejor sello. Este tipo de émbolo tiene una gran efectividad en pozos verticales, pero en pozos horizontales presenta una baja eficiencia en el levantamiento de líquidos.

Émbolo con segmentos retráctiles. Consta de una serie de paquetes de acero acoplados a unos resortes que le permiten adaptarse a las paredes de la TP durante la carrera para generar un mejor sello.

Dada la simplicidad y los pocos elementos que presenta el método de producción con émbolo viajero, la mayoría de las mejoras a dicho método involucran modificaciones al émbolo, que es el elemento principal del sistema, para poder ampliar el rango de utilización del método o las circunstancias en que puede ser implementado. Uno de los desarrollos tecnológicos más nuevos es el émbolo inteligente.

Émbolo inteligente^{3,4}. Es un dispositivo equipado con sensores internos y un microprocesador capaz de tomar y almacenar datos de presión y temperatura en tiempo real durante las carreras ascendente y descendente. Los sensores pueden medir presiones de hasta 15,000 lb/pg² con un error de 0.024% y temperaturas de hasta 150 °C con un error de 0.15%. La información tomada puede ser descargada cada vez que el pistón se encuentra en la superficie y utilizada para realizar una evaluación y optimización del método con el fin de incrementar su eficiencia. Los datos obtenidos con el émbolo inteligente sirven para indicar varios eventos de importancia para el ciclo del pistón, como son: el momento en que el émbolo entra al líquido durante la carrea descendente y el momento en que el émbolo llega a la superficie. Además, los datos recolectados por el pistón pueden ser usados en modelos dinámicos para no asumir y/o despreciar elementos importantes en las ecuaciones involucradas en la descripción del movimiento del émbolo.

I.4 Ciclo de operación

El ciclo de operación del émbolo viajero se puede dividir principalmente en tres etapas, como se muestra en la *figura 1.12*: la carrea ascendente, la carrera descendente y el incremento de presión del sistema. En algunos casos puede haber una etapa extra, de transición entre la primera y segunda etapas, llamada purga de gas.

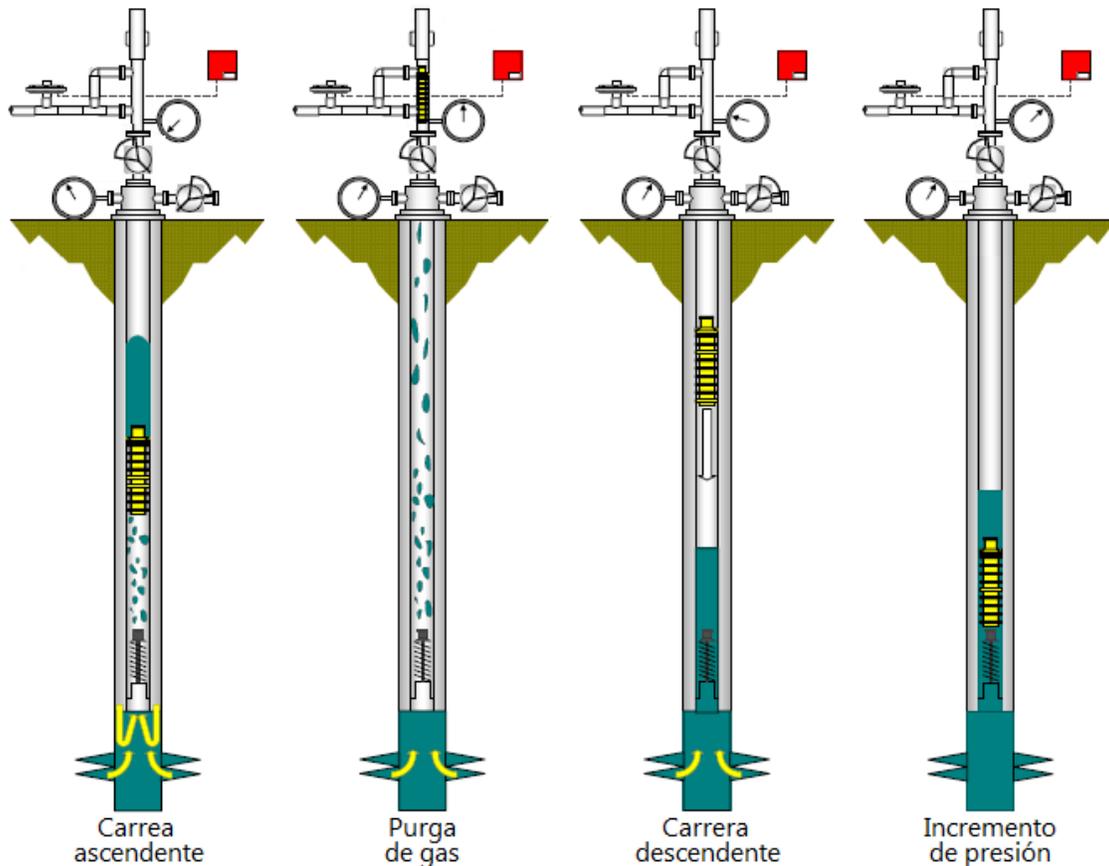


Figura 1.12 Ciclo de pistón viajero

Carrera ascendente

La carrera ascendente comienza en el momento que se abre la válvula motora. En ese momento se crea una diferencia de presiones que provoca que el gas acumulado en el espacio anular comience a expandirse y empuje al émbolo y al bache de líquido hasta la superficie. Para entender mejor esta etapa se puede subdividir en cuatro fases: gas descendiendo por el espacio anular, gas ascendiendo, bache completo en la tubería de producción y producción del bache.

Cabe mencionar que, durante esta etapa, la formación puede comenzar a aportar fluidos al pozo si la presión del yacimiento así lo permite, es decir, habrá aporte de fluidos del yacimiento a partir del momento en que la presión de fondo fluyendo sea menor a la presión del yacimiento.

Gas descendiendo por el espacio anular

Esta fase se caracteriza por que el bache de líquido sobre el émbolo, el émbolo y líquido por debajo del émbolo comienzan a ascender en el interior de la tubería de producción (TP), mientras que en el espacio anular el casquete de gas a presión y una columna de líquido viajan en forma descendente hasta que el gas alcanza la entrada a la TP, como puede observarse en la *figura 1.13*.

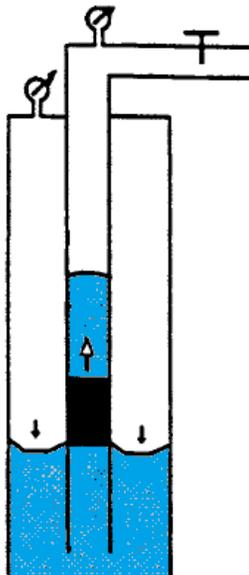


Figura 1.13 Descenso del gas por el espacio anular

Gas ascendiendo

La *figura 1.14* muestra cómo el bache de líquido y el émbolo siguen ascendiendo mientras que el gas que ha logrado entrar en la tubería de producción empieza a formar burbujas. Gracias a la expansión por la disminución en la presión, estas burbujas comienzan a colisionar para formar burbujas más grandes que, a su vez, tienden a formar burbujas de Taylor. Con la aparición de las burbujas de Taylor se presenta el régimen de flujo tipo bache y, con él, el asociado fenómeno de resbalamiento del líquido. La cantidad de líquido que se pierde está controlada por el resbalamiento asociado a la burbuja de Taylor.

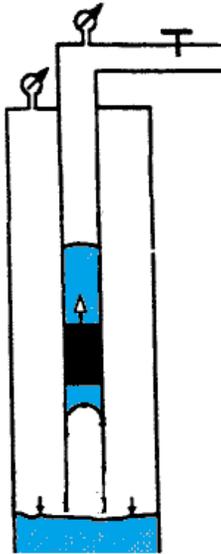


Figura 1.14 Ascenso del gas por la TP

Bache completo en la tubería de producción

En esta fase, mostrada en la *figura 1.15*, el bache de líquido y el émbolo siguen ascendiendo por la TP impulsados por el gas. El volumen de líquido que es dejado atrás está controlado por la velocidad de ascenso relativa entre el émbolo y el bache, y por el sello que el émbolo forme con la TP.

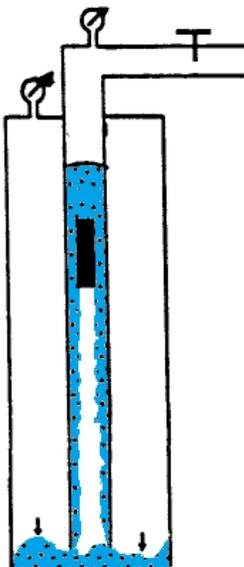


Figura 1.15 Bache ascendiendo por la TP

Producción del bache

En este punto, el bache de líquidos llega a la superficie y comienza a pasar a la tubería de producción. Esta etapa se caracteriza porque el bache de líquido comienza a disminuir su tamaño, disminuyendo así la resistencia al flujo y provocando una aceleración súbita en la que aumenta la velocidad de ascenso del émbolo. Esta etapa termina cuando el bache ha sido producido en su totalidad y el émbolo es recibido por el lubricador. En la *figura 1.16* se puede apreciar esta etapa.

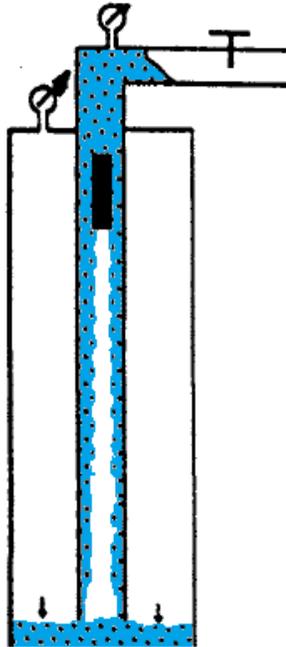


Figura 1.16 Producción del bache

Purga de gas

Esta etapa solamente se presenta cuando el pistón no comienza la carrera descendente inmediatamente después de su llegada a la superficie. En este caso, tras haber producido el bache de líquido, si la válvula motora no se cierra y el émbolo es mantenido en superficie, se presenta esta etapa en la que el gas fluye libremente hacia la línea de descarga. Bajo algunas circunstancias, la mayor parte de la producción de líquidos se tiene durante esta etapa en la que se presenta un flujo de gas que acarrea una gran cantidad de líquido. La *figura 1.12* muestra esta etapa.

Carrera descendente

Ésta es la segunda etapa del ciclo y comienza en el instante en que se cierra la válvula motora, impidiendo así el flujo por la tubería de producción. El émbolo se encuentra alojado en el lubricador. En ese momento, el émbolo es liberado y rápidamente se acelera en caída libre hasta el fondo del pozo, como se muestra en la *figura 1.12*. Si el siguiente bache de líquido ya ha comenzado a formarse, el émbolo descenderá una parte de la carrera en gas y la segunda parte dentro del líquido que forma al siguiente bache. En este momento, los fluidos de la formación son aportados al pozo para mezclarse con el líquido dejado atrás durante la carrera ascendente del émbolo por resbalamiento, además del líquido que gotea por las paredes de la tubería de producción y que finalmente se juntará con el líquido que el émbolo limpie de las paredes internas de la TP en la carrera descendente. Todo este líquido acumulado servirá para formar el próximo bache.

Incremento de presión del sistema

La tercera y última etapa del ciclo comienza en el momento en que el émbolo llega al final de la tubería de producción y es recibido por el resorte de fondo, sitio en el que descansará durante esta etapa, como se muestra en la *figura 1.12*. Los fluidos del yacimiento son transmitidos al pozo para ocupar su lugar predilecto y alistarse para la siguiente etapa, esto es, el gas ocupa la sección superior tanto del espacio anular como de la TP y el líquido ocupa la parte inferior. El gas comienza a acumular presión y comprimirse, mientras que el líquido forma una columna que sobre pasa el nivel del émbolo, formando así el nuevo bache. Esto sucede hasta que la presión en la superficie de la tubería de revestimiento alcanza la presión máxima establecida, punto en el que, por medio del controlador de superficie, se abre la válvula motora, iniciando el nuevo ciclo. Existen dispositivos de fondo que desvían el gas al espacio anular para propiciar el máximo aprovechamiento del gas.

1.5 Aplicación del pistón viajero¹

El pistón viajero tiene diversas aplicaciones en campo, en un amplio rango de condiciones. Entre sus aplicaciones más importantes se encuentran:

Pozos productores de gas. Cuando la producción de un pozo de gas se encuentra en la región de colgamiento de líquido, comienza a producir baches de líquido intermitentemente. Estas condiciones de producción no son favorables y suelen provocar problemas de carga de líquidos en los que una acumulación de líquido en el fondo del pozo crea una contrapresión que dificulta la producción del gas. En

superficie, este fenómeno se percibe como cabeceo y es un indicador de que ese pozo es candidato para la implementación del pistón viajero. En este caso, el émbolo ayudará al pozo a producir de manera más eficiente, buscando maximizar la producción de gas al utilizar la energía propia del yacimiento para remover el líquido acumulado en el fondo del pozo implementando un pistón libre que aproveche la energía, en forma de presión, acumulada en el gas que se almacena en el espacio anular. Así, el émbolo formará una interface que evitará que el gas atraviese la fase líquida que se desea llevar a la superficie durante la producción.

De esta manera, con la configuración adecuada de los elementos superficiales y subsuperficiales, el Pistón Viajero ayuda a descargar continuamente los líquidos acumulados que impiden al pozo producir el gas a un gasto óptimo. Cabe señalar que en pozos de gas es especialmente común tener un periodo de producción adicional llamado purga de gas en el cual, una vez que el pistón llega al lubricador es mantenido ahí por un lapso de tiempo para producir una mayor cantidad de gas antes de liberar el pistón y comenzar la carrera descendente y con ello el periodo de incremento de presión.

Pozos productores de aceite. Cuando la RGL se incrementa demasiado durante la producción de un pozo de aceite, llega el punto en el que el gas producido fluye con más facilidad que el aceite. En estos pozos, la implementación del método del pistón viajero tendrá como finalidad maximizar la producción de líquidos. En pozos de aceite es menos común tener el periodo de producción adicional. En caso de presentarse, una vez que el pistón llega al lubricador es mantenido ahí por un lapso de tiempo para tener una producción adicional gas que arrastre consigo parte del líquido que se encontraba debajo del pistón, maximizando la producción de aceite, antes de la liberación el pistón y el comienzo de la carrera descendente y del periodo de incremento de presión. En algunas ocasiones durante este periodo de tiempo llamado post flujo, en vez de purga de gas, se tiene la mayor producción de líquidos.

Este método presenta ventajas principalmente económicas sobre otros métodos que podrían utilizarse para producir bajo las mismas condiciones, como el bombeo mecánico (BM). Dichas ventajas son una inversión inicial menor y costos operacionales más bajos. Sin embargo, también presenta desventajas como la necesidad de contar con suficiente RGL para satisfacer los requerimientos de energía para el levantamiento del líquido y la complejidad del método que se manifiesta en una falta de compresión del mismo y una falta de los elementos necesarios para modelarlo eficientemente con la finalidad optimizar el método y resolver los problemas operacionales. No obstante, los avances tecnológicos siguen intentando eliminar esta desventaja.

Pozos costa afuera. Con una cuidadosa selección se tienen excelentes resultados.

Pozos desviados y horizontales⁵. En pozos que no son verticales, puede aplicarse el pistón viajero, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones: el resorte de fondo debe anclarse lo más al fondo posible para permitir que el bache se forme por encima del pistón; sin embargo, en pozos muy desviados, esto provoca un incremento en la fricción del émbolo con la TP, esto a su vez ocasiona una disminución en la velocidad de la carrera, un aumento en el tiempo del ciclo, un desgaste mayor del pistón y la necesidad de mayor mantenimiento del mismo. Las válvulas de un solo sentido no funcionan correctamente en pozos con ángulos de desviación muy pronunciados, particularmente cuando la válvula se coloca con un ángulo de desviación mayor a 45°, pero con ciclos cortos del método se minimiza este efecto. Algunos tipos de pistones, como los de segmentos expandibles o almohadillas, aunque son de los más eficientes en pozos verticales, no muestran el mismo comportamiento en pozos horizontales, porque en estos pozos se presenta flujo estratificado, gas en la parte superior y líquidos en la parte inferior. Contrario a lo que podría pensarse, el émbolo con almohadillas aumenta su velocidad después del KOP (*Kick-Off Point*) debido a que para realizar la carrera descendente, este tipo de émbolos retracta los segmentos expandibles y por su peso tiende a viajar más pegado a la parte inferior de la TP, dejando un espacio más amplio en la parte superior que permite que el gas que se encuentra debajo del pistón fluya con mayor facilidad por encima de él, incrementando su velocidad de descenso.

Inversión inicial. El pistón viajero, en su versión autónoma, utilizando la energía propia del yacimiento, requiere de un costo de inversión muy bajo aproximadamente un 10% del costo de una unidad de bombeo que realice el mismo trabajo.

Costo de mantenimiento. El costo de manutención es muy bajo debido a los pocos elementos que conforman la infraestructura y, dado que sus funciones son simples tiende a trabajar sin fallas por un largo periodo de tiempo. Además, en su versión autónoma, no requiere de suministro de energía.

Valor de rescate. Aunque no es fácil vender sus componentes cuando ya no se necesitan, debido a la depreciación que tiene el equipo con el paso del tiempo, en algunas ocasiones se puede conseguir un trueque.

Tamaño del equipo superficial. El equipo superficial es muy discreto. El lubricador que se coloca en la cima del árbol de producción y el controlador superficial son los elementos más grandes y generalmente de dimensiones no muy exageradas.

Software de control. La implementación de un software de control es una modificación que presenta muchos beneficios ya que permite controlar las condiciones del ciclo de una mejor manera.

TP y TR. No presenta restricciones de diámetros, aunque se prefieren tuberías de producción reducidas. Si se puede acumular suficiente gas en el espacio anular el método puede implementarse. Un factor a considerar es que la TP debe ser del mismo diámetro desde el fondo hasta la superficie.

Espacio anular. Se requiere un volumen adecuado en el espacio anular para contener el gas que servirá de impulsor al émbolo.

Empacador. El método del émbolo viajero requiere que exista comunicación entre el espacio anular y la TP. Por lo tanto, es preferible que el aparejo no cuente con un empacador pero en caso de que se tenga un empacador se tienen las siguientes opciones: (1) Desanclar el empacador y de preferencia retirarlo; si no es posible retirarlo, puede dejarse en el fondo permitiendo la comunicación entre el espacio anular y la TP; (2) perforar la TP; (3) perforar el empacador; (4) instalar válvulas de bombeo neumático.

Profundidad. Normalmente hasta 10,000 pies, pero se ha logrado adaptar hasta profundidades de 20,000 pies.

Relación gas-líquido (RGL). Si bien existe una RGL óptima para realizar el levantamiento de los líquidos, el pistón viajero puede implementarse con exceso o con deficiencia de gas. Si se tiene un exceso de gas (RGL mayor a la óptima) el pistón se retiene en el lubricador por un periodo de tiempo establecido una vez que se produjo el bache y antes de ser liberado, permitiendo así un periodo de producción en el que se libera el exceso de gas. Si se tiene una RGL óptima, lo preferible es que el pistón comience la carrera descendente tan pronto llegue a la superficie, tratando de evitar un periodo de producción de gas para aprovechar al máximo el gas disponible. Si se tiene una deficiencia de gas, puede inyectarse gas a presión por el espacio anular para alcanzar una RGL óptima.

Presión de fondo. Puede utilizarse con presiones de fondo bajas, de menos de 150 lb/pg² a una profundidad de 10,000 pies.

Temperatura. Tiene buen manejo de temperaturas, por lo tanto no es normalmente una limitante. Se aplica hasta en temperaturas de 500 °F.

Gastos. Con émbolos convencionales, la producción máxima está limitada por el número de ciclos, generalmente a un valor cercano a los 200 barriles de fluido por día (bfpd) a una profundidad de 10,000 pies, pero esta cifra puede incrementarse hasta 400 bfpd con émbolos de viaje rápido o de alta velocidad que son capaces

de realizar la carrera descendente mientras el pozo está fluyendo. Así, si las condiciones lo permiten, el pistón puede comenzar la carrera ascendente al llegar al fondo del pozo, minimizando el tiempo de ciclo. Por otra parte, la capacidad para manejar producciones bajas es excelente, permitiendo gastos de hasta 1 bfpd con altas RGL.

Viscosidades. No es recomendable con fluidos muy viscosos.

Manejo de sólidos. Las arenas normalmente provocan problemas ya que pueden hacer que se atore el pistón, no obstante se han utilizado émbolos tipo brocha cuando se presentan sólidos, aunque éstos terminan por desgastar las brochas en poco tiempo.

Manejo de agua. Presenta un buen manejo de agua, el bache producido puede estar formado por aceite, agua o una mezcla de ambos.

Parafinas. El émbolo, al realizar las carreras ascendente y descendente, limpia las paredes de la TP, dejándolas libres de acumulaciones de parafinas. En pozos con este problema, la remoción continua de parafinas se refleja en tiempos de operación más largos, es decir, mayor lapso de tiempo entre reparaciones, por lo tanto disminuye el costo de mantenimiento del pozo. Cuando se aplica el método con el único fin de remover parafinas, la experiencia ha demostrado que se prefieren ciclos cortos para maximizar la eficiencia.

Seguridad. El equipo opera de manera segura, no tiene riesgos muy altos asociados.

Vigilancia. No requiere de vigilancia continua y es fácil monitorear su desempeño. Además, controladores superficiales y microprocesadores facilitan su manejo y ajuste de ciclo.

Pruebas de pozo. Es relativamente fácil realizar pruebas en el pozo ya que, de ser necesario, los equipos de fondo pueden ser retirados con línea de acero.

Combinación con un Sistema Artificial de Producción (SAP)^{6,7}. El Pistón Viajero es compatible y principalmente utilizado en conjunto con el bombeo neumático, uno de las SAP más utilizados alrededor del mundo y el más utilizado en México. El BN continuo se implementa cuando la energía del yacimiento es todavía alta, sin embargo, conforme el yacimiento pierde presión se llega al punto en que el pozo comienza a producir intermitentemente y es en este momento cuando se puede combinar el BNI con el Pistón Viajero. Cuando se combina con el BNI, el émbolo traerá dos principales beneficios: reducir el resbamiento de líquido durante la producción del bache para mejorar la recuperación de líquidos y reducir los requerimientos de inyección de gas para mejorar la eficiencia de levantamiento del

líquido. Pozos con alto índice de productividad (>0.5 bpd/lb/pg²) y baja presión de fondo fluyendo se clasifican como los mejores candidatos para esta combinación. El uso de este método combinado (Pistón Viajero asistido con BNI) puede llegar a mejorar en 15% la recuperación de aceite y, a su vez, disminuir el volumen de gas inyectado en un 30%, proveyendo así una mejora considerable al bombeo neumático.

El método combinado PV-BNI se divide en las mismas etapas que el método de Pistón Viajero convencional: carrera ascendente, purga de gas e incremento de presión en el sistema, que incluye y comienza con la carrera descendente. Sin embargo, en el método combinado, la diferencia principal es que el incremento de presión se da por inyección de gas por el espacio anular en superficie hasta alcanzar una cierta presión establecida en vez de acumular el gas proveniente de la formación.

En cuanto al periodo de duración del ciclo se puede decir que en general, ciclos cortos no son favorables debido a que implican una disminución en la producción debido a que la formación no tiene tiempo suficiente para formar un bache de mayor tamaño, baches pequeños son levantados con mayor facilidad y alcanzan velocidades más elevadas, a mayores velocidades se tiene mayor resbalamiento de líquido y dada la mayor velocidad el ciclo se completa en menor tiempo aumentando en número de ciclos por día provocando un incremento en el consumo de gas. Sin embargo, se tiene una duración óptima del ciclo cuando se tiene la máxima producción por baches de tamaño óptimo y levantamiento del bache a una velocidad que permita la reducción del resbalamiento a su mínimo valor y un número de ciclos por día que optimice el consumo de gas. Ya que ciclos demasiado largos generan baches demasiado grandes que reducen la velocidad de la carrera ascendente y que implican un menor número de ciclos diarios y por lo tanto una menor producción diaria.

I.6 Ventajas y desventajas

Ventajas:

- La principal ventaja que presenta este método es la económica. El costo de instalación es 90% menos que el de una unidad de bombeo. Además, se tiene el ahorro derivado ya que no requiere suministro de energía.
- Los elementos subsuperficiales se instalan y recuperan con línea de acero.
- Flexible, se adapta a un amplio rango de aplicaciones y es fácil modificarlo para adaptarse a cambios en las condiciones de flujo; solamente se requiere

variar la velocidad del ciclo, las presiones o el tiempo para incrementar su eficiencia.

- Simple diseño, instalación y operación.
- Instalaciones superficiales pequeñas y no genera mucho ruido por lo que es considerado un método discreto.
- Puede aplicarse en pozos terrestres, costa afuera, verticales, desviados, horizontales, de gas y de aceite.
- Soporta altas temperaturas sin presentar un mal funcionamiento.
- Maneja grandes volúmenes de gas.
- Elimina la necesidad de espumas.
- Incrementa la producción en pozos con fluidos emulsificados.
- Remueve e impide la acumulación de parafinas.

Desventajas:

- Si el émbolo se pega a la pared, se tienen problemas graves.
- Las profundidades de aplicación están limitadas a 10,000 pies para la versión autónoma convencional. Puede mejorarse con modificaciones pero incrementarían su complejidad y costo.
- Está limitado a volúmenes pequeños de 200 bfpd a 10,000 pies.
- Los líquidos producidos deben tener viscosidades bajas ya que una alta viscosidad impide el buen desplazamiento del émbolo.

Lista de figuras

Figura 1.1 Esquema de instalación del pistón viajero. Obtenido de: <http://www.weatherford.com/Products/Production/PlungerLift/PlungerLiftSystemOverview>

Figura 1.2 Versiones del pistón viajero.

Figura 1.3 Patrones de flujo en tuberías verticales.

Figura 1.4 Flujo tipo bache. GAYÓN, J.; GONZÁLEZ, A. y VARGAS, P. *Uso de imágenes de videos digitales para estimar el hold-up de líquido en tuberías verticales y reconocer los patrones de flujo*. Miniproyecto de Ingeniería Química, [s.a.].

Figura 1.5 Perfil de velocidades en una tubería vertical.

Figura 1.6 Infraestructura del pistón viajero.

Figura 1.7 Controlador superficial. Multi Products Company, Inc. *Operating instructions for TIMAX E-Z Single valve controller*. (DE, 13 de marzo, 2012: www.plungerlift.com).

Figura 1.8 Válvula motora. Obtenido de: <http://www.casing.com.ar/valvulas.html>

Figura 1.9 Lubricador. Obtenido de: <http://www.casing.com.ar/lubricadores.html>

Figura 1.10 Resorte de fondo. Obtenido de: <http://www.casing.com.ar/resortes.html>

Figura 1.11 Pistón. Obtenido de: <http://www.casing.com.ar/pistones.html>

Figura 1.12 Ciclo del pistón viajero. LUCERO ARANDA, F. J. *Manejo de pozos de gas*, Apuntes de Sistemas Artificiales de Producción, Tema VII. 2011.

Figura 1.13 Descenso del gas por el espacio anular. MARCANO, L. y CHACÍN, J. *Mechanistic Design of Conventional Plunger-Lift Installation*. Intevep S.A., SPE Advanced Technology Series, Vol. 2, No. 1, SPE 23682, 1992.

Figura 1.14 Ascenso del gas por la TP. MARCANO, L. y CHACÍN, J. *Mechanistic Design of Conventional Plunger-Lift Installation*. Intevep S.A., SPE Advanced Technology Series, Vol. 2, No. 1; SPE 23682, 1992.

Figura 1.15 Bache ascendiendo por la TP. MARCANO, L. y CHACÍN, J. *Mechanistic Design of Conventional Plunger-Lift Installation*. Intevep S.A., SPE Advanced Technology Series, Vol. 2, No. 1; SPE 23682, 1992.

Figura 1.16 Producción del bache. MARCANO, L. y CHACÍN, J. *Mechanistic Design of Conventional Plunger-Lift Installation*. Intevep S.A., SPE Advanced Technology Series, Vol. 2, No. 1; SPE 23682, 1992.

Referencias

1. CLEGG, J. D.; HEIN, N. W. y BUCARAM, S. M. *Recommendations and Comparisons for Selecting Artificial-Lift Methods*. SPE 24834, 1993.
2. LUCERO ARANDA, F. J. *Manejo de pozos de gas*, Apuntes de Sistemas Artificiales de Producción, Tema VII. 2011.
3. CHAVA, G. K.; FALCONE, G. y TEODORIU, C. *Development of a New Plunger-Lift Model Using Smart Plunger Data*. SPE 115934, 2008.
4. CHAVA, G. K.; FALCONE, G. y TEODORIU, C. *Plunger Lift Modeling Towards Efficient Liquid Unloading in Gas Wells*. SPE 124515, 2009.
5. SASK, D.; KOLA, D. y TUFTIN, T. *Plunger Lift Optimization in Horizontal Gas Wells: Case Studies and Challenges*. CSUG/SPE 137860, 2010.
6. CHACÍN, J.; SCHMIDT, Z. y DOTY, D. *Modeling and Optimization of Plunger Lift Assisted Intermittent Gas Lift Installations*. SPE 23683, 1994.
7. BELLO, O.; FALCONE, G.; XU, J. y SCOTT, S. *Performance Evaluation of a Plunger Assisted Intermittent Gas Lift System*. SPE 141251, 2011.

CAPÍTULO II

MODELOS DE ANÁLISIS DEL PISTÓN VIAJERO



II.1 Antecedentes - modelos previos

El estudio y modelado del comportamiento del pistón viajero ha sido de gran utilidad para el aumento de la eficiencia de este método mejorador de flujo. Aunque existen otros métodos, el pistón viajero tiene la ventaja de ser económicamente más atractivo y, en ocasiones, una solución más permanente.

En 1965, Foss y Gaul¹ desarrollaron el primer análisis matemático del émbolo viajero con base en la suma de las fuerzas que interactúan con el émbolo a condiciones de superficie. Dicho análisis se basó en el comportamiento observado de pruebas efectuadas a 100 pozos del campo Ventura y culminó con la creación de una correlación entre los datos calculados y los datos medidos en campo para generar unas curvas con las que pudieran determinarse: la presión en el espacio anular (EA) necesaria para elevar un bache de cierto tamaño, el volumen requerido de gas y el tiempo del ciclo.

En 1972, Hacksma² optimizó el estudio hecho por Foss y Gaul¹ al incorporar curvas de comportamiento de afluencia (IPR) en un modelo estático, para conjuntar el comportamiento del pistón con el comportamiento del yacimiento. Además, él identifica como ciclo óptimo a aquél que tiene el gas suficiente para levantar el bache de líquido en el momento en que el pistón llega al fondo del pozo en la carrera descendente.

En 1980, Abercrombie³ presenta un modelo estático basado en el trabajo de Foss y Gaul¹, pero a diferencia de ellos, él propuso una velocidad de la carrera descendente menor, también constante, la cual determinó que era más realista para el caso en que el émbolo viaja a través del gas.

En 1981, Lea⁴ publica el primer modelo matemático dinámico argumentando que el modelo de Foss y Gaul¹ sobrepredecía la presión necesaria para levantar el émbolo y el bache debido a la caída de presión por fricción relacionada a la velocidad y sobrepredecía en cerca de 16% el volumen de gas requerido. Lea propone que la velocidad ascendente del émbolo y del bache es variable e igual para ambos, y que la presión en el espacio anular no permanece constante, por lo que se basó en un balance de momentos, tanto del bache como del pistón, para desarrollar su modelo. Concluyó que el resbalamiento del líquido decrece al incrementar la velocidad debido al aumento en la presión del espacio anular.

En ese mismo año, White⁵ presenta un modelo para aplicaciones del pistón viajero en pozos con bombeo neumático intermitente (BNI) basado en la similitud de ambos métodos. White⁵ considera que el resbalamiento es una función de la

relación de la velocidad del bache y de la burbuja que lo impulsa y que éste disminuirá al incorporar el émbolo al bombeo neumático, ya que el paso del gas por el espacio anular entre el pistón y la tubería de producción evitará que el líquido sea dejado atrás. Los resultados obtenidos por White⁵ se muestran en la *figura 2.1* y demuestran que el émbolo incrementa la eficiencia de levantamiento al reducir el resbalamiento a una cierta relación de presiones entre la tubería de revestimiento (P_c) y la tubería de producción (P_τ).

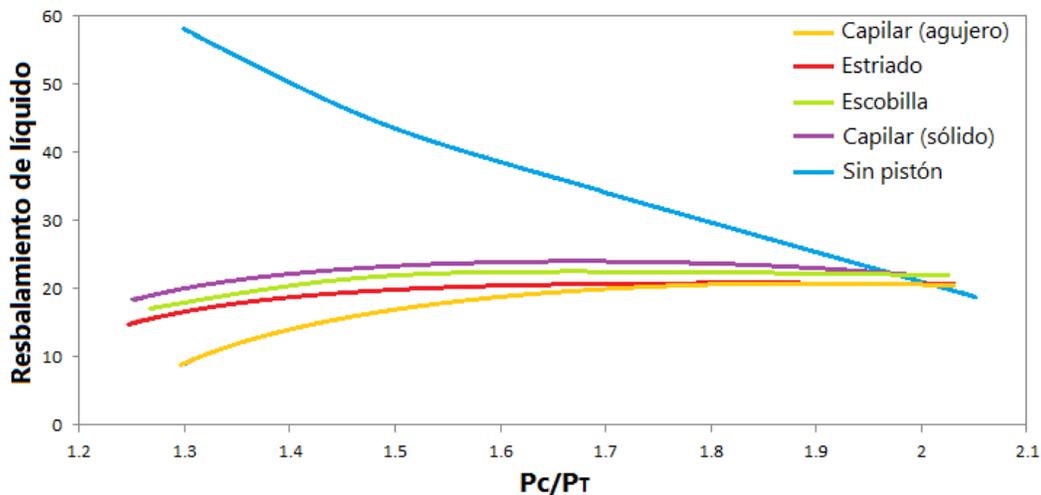


Figura 2.1 Resbalamiento de líquido según el tipo de pistón viajero

En 1982, Schmidt⁶ crea un modelo hidrodinámico para la carrera ascendente en una instalación con bombeo neumático intermitente (BNI) y émbolo viajero en el que trata de representar, de una manera más real, el fenómeno, basándose en ecuaciones de conservación y analizando el flujo bifásico por encima y por debajo del émbolo. El modelo matemático consiste en ecuaciones sencillas que consideran la mayoría de las variables físicas como densidad, velocidad, presión, etc. Schmidt⁶ propone una rápida aceleración ascendente al principio de la carrera ascendente, provocando que el pistón tienda a moverse más rápido que el líquido, resultando en una pérdida de líquido llamada resbalamiento del líquido. Posteriormente, la velocidad de ascenso se estabiliza por un tiempo, pero al llegar el bache a la superficie e iniciarse su producción, la carga hidrostática disminuye y se reduce la fricción por el fluido, propiciando así una nueva aceleración del pistón.

En 1992, Marcano y Chacín⁷ establecieron un modelo mecanicista con base en ecuaciones diferenciales no lineales fundamentales de balance de momentos y conservación de la masa. Su principal aportación fue el modelado del resbalamiento del líquido a través del émbolo durante la carrera ascendente, ya que determinaron que el resbalamiento es distinto en cada etapa de la carrera

ascendente. Analizaron todo el ciclo del émbolo para un determinado volumen de control. Para lograrlo, manejaron tres etapas principales: carrera ascendente, carrera descendente y aumento de presión, pero subdividieron la carrera ascendente en cuatro: gas descendiendo por el espacio anular, gas ascendiendo por la TP, bache completo subiendo por la TP y producción del bache. Definiendo claramente estas etapas, lograron modelar adecuadamente las velocidades de ascenso del pistón y la relación de la presión necesaria en la TR con el tiempo que le llevaría a la formación aportar la cantidad de gas que generaría dicha presión.

Ese mismo año, Chacín, Schmidt y Doty⁸ desarrollaron un modelo mecanicista con base en ecuaciones de balance de materia y conservación del momento para instalaciones con BNI, en el que incorporan parámetros como la presión del yacimiento, comportamiento de afluencia (IPR), características de las tuberías, características del pistón, presión de inyección disponible, diseño y desempeño de las válvulas del BNI. Para modelar el ciclo, lo dividieron en cuatro etapas: carrera ascendente, producción del bache, purga e incremento de presión. En esta última etapa se incluye la carrera descendente y la regeneración del bache.

En 1997, Gasbarri y Wiggins⁹ presentan un modelo dinámico que mejora el trabajo hecho con anterioridad al analizar más elementos como la carrera descendente, el efecto de la línea de descarga y del separador. Su enfoque maneja múltiples volúmenes de control adyacentes que cubren la totalidad del sistema, es decir, el espacio anular, la TP y la línea de descarga. Además, utiliza la ecuación de balance de momentos aplicada al émbolo y al bache, la ecuación de conservación de la masa y la de continuidad para pozos productores de gas.

II.2 Nuevos modelos

II.2.1 Modelo dinámico

En 2008, Tang y Liang¹⁰ crean un nuevo modelo dinámico para describir el movimiento del pistón tomando en cuenta cambios en la presión de cabeza, tanto de la tubería de producción como de la tubería de revestimiento, además del resbalamiento del líquido, el mecanismo de acumulación de líquidos y la resistencia del émbolo.

Este modelo se aplica para pozos de gas con problemas de carga de líquidos, en el caso en que el único líquido aportado por el yacimiento es agua. Además, implica que el émbolo se mantendrá en el lubricador por un cierto tiempo para maximizar la producción de gas.

La implementación de dicho modelo se basa en las características de las presiones superficiales, es decir, en la variación de la presión de la TP (P_t), así como de la presión de la TR (P_c) en superficie, también llamada presión en el espacio anular. Al ingresar los datos de entrada en las ecuaciones propuestas por el método, tratarán de generarse estas curvas que son de gran importancia, ya que en ellas puede reconocerse claramente el periodo de cierre y de apertura del pozo.

Ecuaciones

Dada una gráfica con las curvas de presiones como la que se muestra en la *figura 2.2*, el primer paso es delimitar los periodos de apertura y cierre.

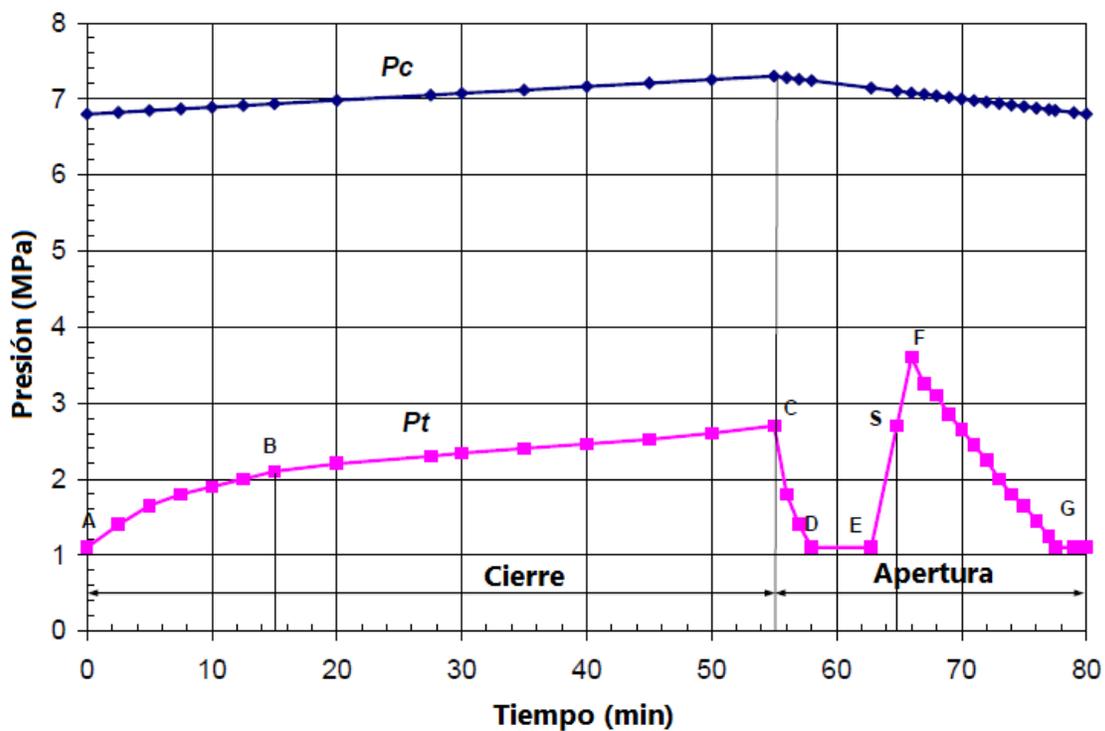


Figura 2.2 Curvas de presiones en la TP y TR en un pozo con pistón viajero

Periodo de cierre

La presión de la TP (P_t) comienza en el punto A, pasa por B y termina en el punto C. Del punto A al B se tiene un incremento súbito de presión debido a que el flujo es detenido repentinamente, por lo que se tiene un periodo de compresión en el que la energía cinética se convierte en energía potencial o de presión.

Posteriormente, del punto B al C hay un incremento de presión constante debido al aporte de los fluidos de la formación.

Una vez hecho lo anterior, las curvas pueden ser descritas por las *ecuaciones 2.1 a 2.6*.

$$P_c(t) = P_{c,A}(t) + K_{c1} \cdot t ; \quad (0 \leq t \leq t_C) \quad 2.1$$

$$P_t(t) = P_{t,A}(t) + K_{t1} \cdot t ; \quad (0 \leq t \leq t_B) \quad 2.2$$

$$P_t(t) = P_{t,B}(t) + K_{t2} \cdot (t - t_B) ; \quad (t_B \leq t \leq t_C) \quad 2.3$$

$$K_{c1} = \frac{P_{c,C} - P_{c,A}}{t_C} \quad 2.4$$

$$K_{t1} = \frac{P_{t,B} - P_{t,A}}{t_B} \quad 2.5$$

$$K_{t2} = \frac{P_{t,C} - P_{t,B}}{t_C - t_B} \quad 2.6$$

Donde

K_{c1} : pendiente para la presión de la TR en el periodo de cierre, [MPa/s]

K_{t1} : pendiente para la presión de la TP en el periodo AB, [MPa/s]

K_{t2} : pendiente para la presión de la TP en el periodo BC, [MPa/s]

$P_{c(t)}$: presión en la tubería de revestimiento para un tiempo dado, [MPa]

$P_{c,A}$: presión en la tubería de revestimiento en el punto A, [MPa]

$P_{c,C}$: presión en la tubería de revestimiento en el punto C, [MPa]

$P_t(t)$: presión en la tubería de producción para un tiempo dado, [MPa]

$P_{t,A}$: presión en la tubería de producción en el punto A, [MPa]

$P_{t,B}$: presión en la tubería de producción en el punto B, [MPa]

$P_{t,C}$: presión en la tubería de producción en el punto C, [MPa]

t : tiempo, [s]

t_B : tiempo al punto B, [s]

t_C : tiempo al punto C, [s]

Periodo de apertura

Para la presión en la TR (P_c) en este periodo se utiliza la ecuación de la línea recta:

$$P_c(t) = P_{c,C} - K_{c2}t \quad 2.7$$

$$K_{c2} = \frac{P_{c,C} - P_{c,A}}{t_{ciclo} - t_C} \quad 2.8$$

Donde

K_{c2} : pendiente para la presión de la TR en el periodo de apertura, [MPa/s]

$P_c(t)$: presión en la tubería de revestimiento para un tiempo dado, [MPa]

$P_{c,A}$: presión en la tubería de revestimiento en el punto A, [MPa]

$P_{c,C}$: presión en la tubería de revestimiento en el punto C, [MPa]

t : tiempo, [s]

t_C : tiempo al punto C, [s]

t_{ciclo} : tiempo total del ciclo, [s]

La presión en la TP tiene un comportamiento más complejo, por lo que se subdivide en tres periodos.

Periodo de producción del gas que está sobre el bache (CDE). En el momento en que comienza la apertura, el gas que se encuentra sobre el bache empieza a expandirse y fluye hacia la línea de descarga; la presión superficial de la TP cae repentinamente hasta alcanzar la presión de la línea de descarga y a partir de ese punto se mantiene constante hasta que llega el bache a la superficie. Para describir la caída de presión CD se utiliza la siguiente ecuación exponencial:

$$P_t(t) = f_1 \cdot e^{-f_2 \cdot t} + f_3 \quad 2.9$$

En la ecuación anterior t comienza de cero, f_1 , f_2 y f_3 dependen de la presión final del periodo de cierre ($P_{t,C}$) y de la presión de la línea de descarga (P_{sp}); y:

$$f_1 = \frac{-BZ + \sqrt{BZ^2 + 4CZ}}{2} \quad 2.10$$

$$BZ = -\frac{2.8P_{t,C}+0.4P_{sp}}{2.4} \quad 2.11$$

$$CZ = -\frac{P_{sp}^2+2.4P_{t,C}-P_{t,C}^2}{2.4} \quad 2.12$$

$$f_2 = -\frac{LnU}{90} \quad 2.13$$

$$U = \frac{[(P_{t,C}+P_{sp})/2.4-(P_{t,C}-f_1)]}{f_1} \quad 2.14$$

$$f_3 = P_{t,C} - f_1 \quad 2.15$$

Donde

P_{sp} : presión en la línea de descarga, [MPa]

$P_t(t)$: presión en la tubería de producción para un tiempo dado, [MPa]

$P_{t,C}$: presión en la tubería de producción en el punto C, [MPa]

t : tiempo, [s]

Si al calcular $P_t(t)$ resulta un valor menor a P_{sp} , no importa, debe manejarse el valor calculado.

Periodo de arribo del émbolo a superficie (ESF). El momento en que el pistón llega al lubricador se marca con una S en la *figura 2.2*, por lo tanto en el periodo ES se está produciendo el bache y se cumple la siguiente correlación empírica:

$$P_{t,S} = P_{t,C} \quad 2.16$$

Donde

$P_{t,C}$: presión en la tubería de producción en el punto C, [MPa]

$P_{t,S}$: presión en la TP en el punto S cuando el émbolo llega al lubricador, [MPa]

La razón por la que existe un incremento de presión continuo del punto E al F es la resistencia por fricción del líquido que está siendo producido. La ecuación que describe esta etapa (ESF) es la 2.17:

$$P_t(t) = P_{sp} + K_{tt}(t - t_E) \quad 2.17$$

$$K_{tt} = \frac{P_{t,C} - P_{sp}}{\Delta t_{ES}} \quad 2.18$$

Donde

K_{tt} : pendiente para la presión de la TP en el periodo ES, [MPa/s]

P_{sp} : presión en la línea de descarga, [MPa]

$P_t(t)$: presión en la tubería de producción para un tiempo dado, [MPa]

$P_{t,C}$: presión en la tubería de producción en el punto C, [MPa]

t : tiempo, [s]

t_E : tiempo en el punto E, [s]

Δt_{ES} : lapso de tiempo entre el punto E y el punto S, [s]

Así, la presión en la TP correspondiente al punto F se calcula con la *ecuación 2.19*:

$$P_{t,F} = P_{sp} + K_{tt}(t_F - t_E) \quad 2.19$$

Donde

K_{tt} : pendiente para la presión de la TP en el periodo EF, [MPa/s]

P_{sp} : presión en la línea de descarga, [MPa]

$P_{t,F}$: presión en la tubería de producción en el punto F, [MPa]

t_E : tiempo en el punto E, [s]

t_F : tiempo en el punto F, [s]

Periodo de producción de gas (FG). Durante este periodo de purga de gas se produce gas mientras el émbolo es mantenido en el lubricador por un lapso de tiempo y se tiene la *ecuación 2.20*:

$$t = \frac{V_t}{C} \operatorname{Ln} \left[\frac{P_{t,F} - 0.5P_{sp} + \sqrt{P_{t,F}^2 - P_{sp}P_{t,F}}}{P_t(t) - 0.5P_{sp} + \sqrt{P_t(t)^2 - P_{sp}P_t(t)}} \right] \quad 2.20$$

$$C = \frac{\pi}{4} d_s^2 \mu \left[2 \cdot \frac{3814.3 T_{av}}{28.97 \gamma_g} \right]^{0.5} \quad 2.21$$

Donde

C : coeficiente de rendimiento de la ecuación de contrapresión para el periodo de producción de gas

d_s : diámetro de la línea de descarga, [m]

P_{sp} : presión en la línea de descarga, [MPa]

$P_t(t)$: presión en la tubería de producción para un tiempo dado, [MPa]

$P_{t,F}$: presión en la tubería de producción en el punto F, [MPa]

T_{av} : temperatura promedio del pozo, [K]

t : tiempo, [s]

V_t : volumen de la tubería de producción, [m³]

γ_g : densidad específica del gas

μ : coeficiente de flujo (~1)

Para describir la caída de presión FG, la *ecuación 2.20* toma la misma forma de ecuación exponencial que la *ecuación 2.9* y resulta la *ecuación 2.22*:

$$P_t(t) = f_4 \cdot e^{-f_5 \cdot t} + f_6 \quad 2.22$$

En la ecuación anterior f_4 , f_5 y f_6 dependen de la presión en el punto F y de la presión en el punto G.

$$f_4 = \frac{-BZ + \sqrt{BZ^2 + 4CZ}}{2} \quad 2.23$$

$$BZ = -\frac{2.8P_{t,F} + 0.4P_{sp}}{2.4} \quad 2.24$$

$$CZ = -\frac{P_{t,G}^2 + 2.4P_{t,F} - P_{t,F}^2}{2.4} \quad 2.25$$

$$f_5 = -\frac{LnU}{90} \quad 2.26$$

$$U = \frac{[(P_{t,F} + P_{t,G})/2.4 - (P_{t,F} - f_4)]}{f_4} \quad 2.27$$

$$f_6 = P_{t,F} - f_4 \quad 2.28$$

Donde

P_{sp} : presión en la línea de descarga, [MPa]

$P_t(t)$: presión en la tubería de producción para un tiempo dado, [MPa]

$P_{t,F}$: presión en la tubería de producción en el punto F, [MPa]

$P_{t,G}$: presión en la tubería de producción en el punto G, [MPa]

t : tiempo, [s]

En esta ocasión si resultara que $P_t(t) < P_{sp}$, entonces se modifica de manera que $P_t(t) = P_{sp}$.

Carrera descendente

Para la carrera descendente se considera el eje x en dirección vertical hacia abajo a partir de la cabeza del pozo, como se muestra en la *figura 2.3*. Entonces, x, x' y x'' representarán la posición, velocidad y aceleración respetivamente.

Émbolo en la columna de gas. Para representar esta etapa se utiliza la segunda ley de Newton.

$$mg + 10^{-6}(P_{tu} - P_{td})A_t - F_{gd} = mx'' \quad 2.29$$

$$P_{tu} = P_t(t)e^{CN \cdot x} \quad 2.30$$

$$P_{td} = P_c(t)e^{CN \cdot x} - H_{ct,E} \rho_L g 10^{-6} \quad 2.31$$

$$CN = \frac{0.03415 \gamma_g}{T_{av} z} \quad 2.32$$

$$F_{gd} = \lambda_{gd} x \quad 2.33$$

Donde

A_t : área transversal interior de la tubería de producción, [m²]

F_{gd} : fuerza de fricción entre el pistón y el gas durante la carrera descendente, [N]

g : aceleración gravitacional, [m/s²]

$H_{ct,E}$: diferencia de alturas del líquido entre la TP y la TR al final del periodo de cierre, [m]

m : masa del pistón, [kg]

$P_c(t)$: presión en la tubería de revestimiento para un tiempo dado, [MPa]

$P_t(t)$: presión en la tubería de producción para un tiempo dado, [MPa]

P_{td} : presión aplicada bajo el pistón, [MPa]

P_{tu} : presión aplicada sobre el pistón, [MPa]

T_{av} : temperatura promedio del pozo, [K]

x : posición del pistón, [m]

x'' : aceleración del pistón, [m/s²]

z : factor de compresibilidad del gas

γ_g : densidad específica del gas

λ_{gd} : coeficiente de resistencia del pistón durante la carrera descendente en el gas

ρ_L : densidad del líquido, [kg/m³]

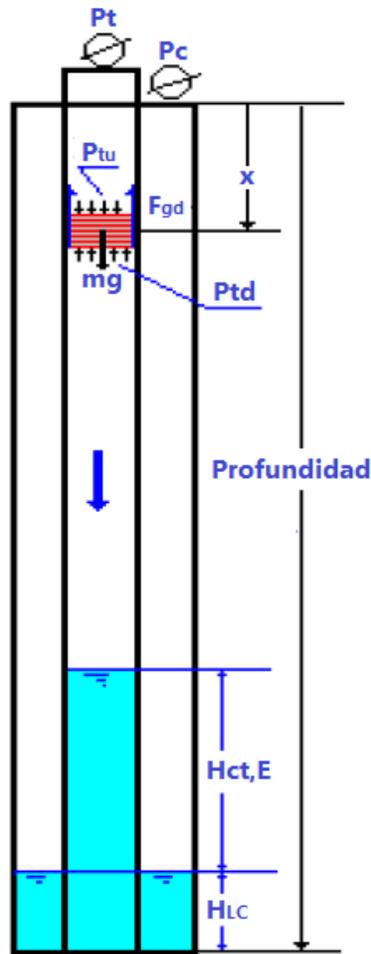


Figura 2.3 Fuerzas y parámetros de la carrera descendente

Émbolo en la columna de líquido. Para representar esta etapa se utiliza el mismo enfoque.

$$mg + 10^{-6}(P_{tu} - P_{td})A_t - F_{ld} = mx'' \quad 2.34$$

$$P_{tu} = P_t(t)e^{[CN \cdot (prof - H_{ct,E} - H_{LC})]} + (x + H_{ct,E} + H_{LC} - prof) \cdot \rho_L g 10^{-6} \quad 2.35$$

$$P_{td} = P_c(t)e^{CN \cdot (prof - H_{LC})} - (prof - x - H_{LC})\rho_L g 10^{-6} \quad 2.36$$

$$F_{ld} = \lambda_{ld} x' \quad 2.37$$

Donde

A_t : área transversal interior de la tubería de producción, [m²]

F_{ld} : fuerza de fricción entre el pistón y el líquido durante la carrera descendente, [N]

g : aceleración gravitacional, [m/s²]

$H_{ct,E}$: diferencia de alturas del líquido entre la TP y la TR al final del periodo de cierre, [m]

H_{LC} : altura del líquido en la TR durante la carrera descendente, [m]

m : masa del pistón, [kg]

$P_c(t)$: presión en la tubería de revestimiento para un tiempo dado, [MPa]

$P_t(t)$: presión en la tubería de producción para un tiempo dado, [MPa]

P_{td} : presión aplicada bajo el pistón, [MPa]

P_{tu} : presión aplicada sobre el pistón, [MPa]

$prof$: profundidad de asentamiento del resorte de fondo, [m]

x : posición del pistón, [m]

x' : velocidad del pistón, [m/s]

x'' : aceleración del pistón, [m/s²]

λ_{ld} : coeficiente de resistencia del pistón durante la carrera descendente en el líquido

ρ_L : densidad del líquido, [kg/m³]

Carrera ascendente

La carrera ascendente puede subdividirse en dos etapas, antes y después de que el bache llegue a la superficie. La *figura 2.4* muestra el conjunto de fuerzas que interactúan durante la carrera ascendente, así como los parámetros de análisis más importantes.

Antes de que el bache llegue a superficie. Aplicando la segunda ley de Newton.

$$(P_{td} - P_{tu})A_t 10^{-6} - mg - F_{1u} = mx'' \quad 2.38$$

$$P_{tu} = P_t(t)e^{CN \cdot (prof - x - H_{lu})} + H_{lu}\rho_L g 10^{-6} + FH \quad 2.39$$

$$P_{td} = \frac{P_c(t)e^{CN \cdot prof - H_1\rho_L g 10^{-6}}}{e^{CN \cdot (x - H_1)}} \quad 2.40$$

$$F_{1u} = \lambda_{1u}x \quad 2.41$$

$$FH = \frac{f\rho_L(x')^2 H_{lu} 10^{-6}}{2d_t} \quad 2.42$$

El factor de fricción f depende del número de Reynolds (N_{Re}) y de la rugosidad relativa (ε).

$$N_{Re} = \frac{\rho_L x' d_t}{\mu_L} \quad 2.43$$

Donde

A_t : área transversal interior de la tubería de producción, [m²]

d_t : diámetro interno de la tubería de producción, [m]

F_{1u} : fuerza de fricción durante la carrera ascendente antes de que el bache llegue a superficie, [N]

FH : caída de presión debida a la fricción aplicada en el bache, [MPa]

f : factor de fricción

g : aceleración gravitacional, [m/s²]

H_1 : altura del líquido dentro de la TP durante el periodo de apertura, [m]

H_{lu} : altura del bache, [m]

m : masa del pistón, [kg]

$P_c(t)$: presión en la tubería de revestimiento para un tiempo dado, [MPa]

$P_t(t)$: presión en la tubería de producción para un tiempo dado, [MPa]

P_{td} : presión aplicada bajo el pistón, [MPa]

P_{tu} : presión aplicada sobre el pistón, [MPa]

$prof$: profundidad de asentamiento del resorte de fondo, [m]

x : posición del pistón, [m]

x' : velocidad del pistón, [m/s]

x'' : aceleración del pistón, [m/s²]

λ_{1u} : coeficiente de resistencia del pistón durante la primera etapa de la carrera ascendente

μ_L : viscosidad del líquido, [kg/m·s]

ρ_L : densidad del líquido, [kg/m³]

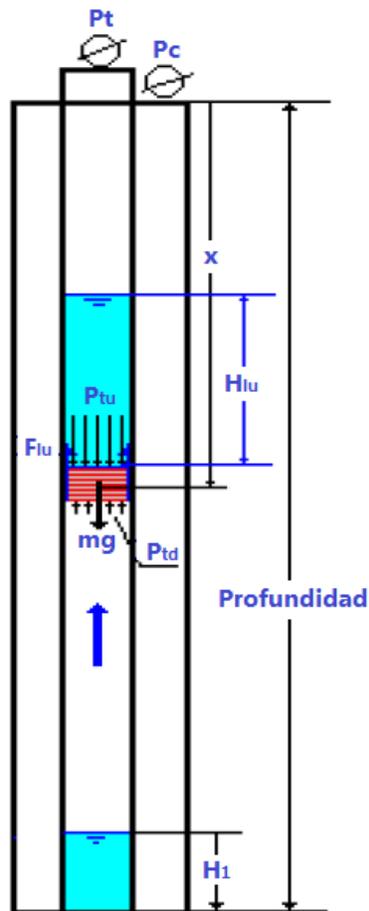


Figura 2.4 Fuerzas y parámetros de la carrera ascendente

Cuando el bache ha llegado a la superficie. Las ecuaciones 2.38, 2.40, 2.42 y 2.43 permanecen constantes, únicamente se modifican las ecuaciones 2.39 y 2.41 para sustituirlas con las ecuaciones 2.44 y 2.45.

$$P_{tu} = P_t(t) + (prof - x)\rho_L g 10^{-6} - FH \quad 2.44$$

$$F_{2u} = \lambda_{2u}x' \quad 2.45$$

Donde

F_{2u} : fuerza de fricción durante la carrera ascendente tras la llegada del bache a la superficie, [N]

FH : caída de presión debida a la fricción aplicada en el bache, [MPa]

g : aceleración gravitacional, [m/s²]

$P_t(t)$: presión en la tubería de producción para un tiempo dado, [MPa]

P_{tu} : presión aplicada sobre el pistón, [MPa]

$prof$: profundidad de asentamiento del resorte de fondo, [m]

x : posición del pistón, [m]

x' : velocidad del pistón, [m/s]

ρ_L : densidad del líquido, [kg/m³]

λ_{2u} : coeficiente de resistencia del pistón durante la segunda etapa de la carrera ascendente

Acumulación de líquido

Para este análisis se adopta el enfoque propuesto por Lea⁴ en 1981, pero se incorpora el efecto de resbalamiento del líquido y se considera la transferencia de líquido de la TP hacia el espacio anular durante el periodo de incremento de presión. La *figura 2.5* muestra los parámetros que toman importancia para el análisis de este periodo de tiempo.

Transferencia de líquido de la TP al espacio anular durante el periodo de incremento de presión. En general, el nivel dentro de la TP será mayor al del espacio anular y la diferencia de alturas estará dada por las *ecuaciones 2.46 a 2.48*:

$$H_{ct,B} = \frac{P_{c0} \cdot e^{(CN \cdot prof)} - P_{t0} \cdot e^{(CN \cdot (prof - H_{ct,B}))}}{\rho_L g 10^{-6}} \quad 2.46$$

$$H_{ct,E} = \frac{P_{c1} \cdot e^{(CN \cdot prof)} - P_{t1} \cdot e^{(CN \cdot (prof - H_{ct,E}))}}{\rho_L g 10^{-6}} \quad 2.47$$

$$H_{ct,av} = \frac{H_{ct,B} + H_{ct,E}}{2} \quad 2.48$$

Donde

g : aceleración gravitacional, [m/s²]

$H_{ct,av}$: promedio de la diferencia de alturas del líquido entre la TP y la TR durante el periodo de cierre, [m]

$H_{ct,B}$: diferencia de alturas del líquido entre la TP y la TR al inicio del periodo de cierre, [m]

$H_{ct,E}$: diferencia de alturas del líquido entre la TP y la TR al final del periodo de cierre, [m]

P_{c0} : presión en la TR al inicio del periodo de cierre, [MPa]

P_{c1} : presión en la TR al final del periodo de cierre, [MPa]

P_{t0} : presión en la TP al inicio del periodo de cierre, [MPa]

P_{t1} : presión en la TP al final del periodo de cierre, [MPa]

$prof$: profundidad de asentamiento del resorte de fondo, [m]

ρ_L : densidad del líquido, [kg/m³]

Además, como $(P_{c0} - P_{t0}) > (P_{c1} - P_{t1})$ la diferencia de alturas será mayor al principio del periodo de incremento de presión que al final, por eso la altura del líquido transferido se encontrará con la *ecuación 2.49*:

$$H_{L,tran} = \frac{(H_{ct,B} - H_{ct,E})A_t}{A_t + A_a} \quad 2.49$$

Donde

A_a : área transversal del espacio anular, [m²]

A_t : área transversal interior de la tubería de producción, [m²]

$H_{ct,B}$: diferencia de alturas del líquido entre la TP y la TR al inicio del periodo de cierre, [m]

$H_{ct,E}$: diferencia de alturas del líquido entre la TP y la TR al final del periodo de cierre, [m]

$H_{L,tran}$: altura del líquido transferido entre la TP y la TR en el periodo de cierre, [m]

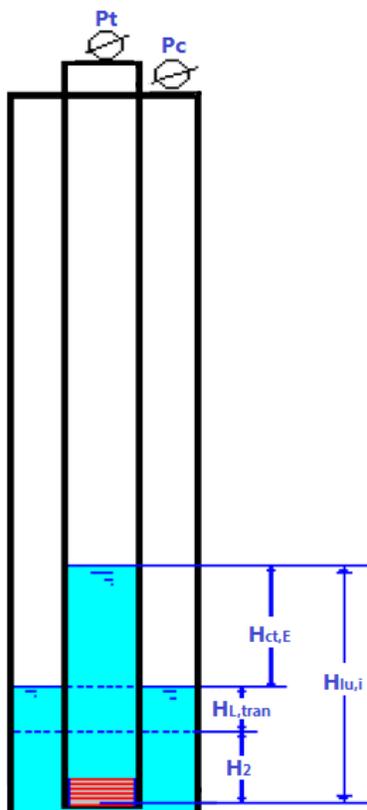


Figura 2.5 Acumulación de líquido

Acumulación de líquido durante el periodo de incremento de presión. De la misma manera que Lea⁴, se considera que los fluidos aportados por la formación entrarán igualmente a la TP y al espacio anular. Para calcular dicha altura se tiene la ecuación 2.50:

$$H_2 = \frac{[(P_c - P_{c0})V_a + (P_t - P_{t0})(V_t - H_{ct,av}A_t)] \cdot e^{\left(\frac{CN \cdot prof}{2}\right)}}{\frac{RGL \cdot P_s \cdot T_{av} \cdot z}{T_s} \cdot (A_t + A_a) + (P_c A_a + P_t A_t) \cdot e^{\left(\frac{CN \cdot prof}{2}\right)}} \quad 2.50$$

Donde

A_a : área transversal del espacio anular, [m²]

A_t : área transversal interior de la tubería de producción, [m²]

H_2 : altura del líquido en la TR durante el periodo de cierre debido al flujo de la formación, [m]

$H_{ct,av}$: promedio de la diferencia de alturas del líquido entre la TP y la TR durante el periodo de cierre, [m]

P_c : presión en la tubería de revestimiento, [MPa]

P_{co} : presión en la TR al inicio del periodo de cierre, [MPa]

P_s : presión en la superficie, [MPa]

P_t : presión en la tubería de producción, [MPa]

P_{to} : presión en la TP al inicio del periodo de cierre, [MPa]

$prof$: profundidad de asentamiento del resorte de fondo, [m]

RGL : relación gas-líquido, [m³/m³]

T_{av} : temperatura promedio del pozo, [K]

T_s : temperatura superficial, [K]

V_a : volumen del espacio anular, [m³]

V_t : volumen de la TP, [m³]

z : factor de compresibilidad

Con esta nueva ecuación, H_{LC} de las *ecuaciones 2.35 y 2.36* puede calcularse como:

$$H_{LC} = H_2 + H_{L,tran} \quad 2.51$$

Donde

H_2 : altura del líquido en la TR durante el periodo de cierre debido al flujo de la formación, [m]

$H_{L,tran}$: altura del líquido transferido entre la TP y la TR en el periodo de cierre, [m]

H_{LC} : altura del líquido en la TR durante la carrera descendente, [m]

Altura del bache. La altura inicial del bache puede calcularse con la *ecuación 2.52*:

$$H_{lu,i} = H_{ct,E} + H_{L,tran} + H_2 \quad 2.52$$

Donde

H_2 : altura del líquido en la TR durante el periodo de cierre debido al flujo de la formación, [m]

$H_{ct,E}$: diferencia de alturas del líquido entre la TP y la TR al final del periodo de cierre, [m]

$H_{L,tran}$: altura del líquido transferido entre la TP y la TR en el periodo de cierre, [m]

$H_{lu,i}$: altura inicial del bache, [m]

El resbalamiento del líquido es una función lineal de la velocidad del pistón y se calcula con la *ecuación 2.53*:

$$FB = a \cdot x' b \quad 2.53$$

Donde

FB : coeficiente de resbalamiento del líquido, [m³/s]

x' : velocidad del pistón, [m/s]

Además a y b son constantes dependientes del tipo de pistón que se esté empleando. Mower *et al.*¹¹ presentaron curvas para los valores de a y b de los pistones más comerciales. Si no se puede encontrar una pareja de a y b o no se conoce el tipo de pistón empleado, se recomienda utilizar la línea recta promedio con los datos de las curvas existentes.

Así, para calcular la altura del bache en cualquier momento, se tiene la *ecuación 2.54*.

$$H_{lu}(t_{i+1}) = H_{lu}(t_i) - \frac{FB}{A_t} \Delta t_i \quad 2.54$$

Donde

A_t : área transversal interior de la tubería de producción, [m²]

FB : coeficiente de resbalamiento del líquido, [m³/s]

$H_{lu}(t_i)$: altura del bache al inicio del periodo de tiempo, [m]

$H_{lu}(t_{i+1})$: altura del bache después de un lapso de tiempo, [m]

Δt_i : lapso de tiempo, [s]

Acumulación de líquido durante el periodo de apertura. En este caso, dado que la TR permanece cerrada, los fluidos de la formación entran preferentemente en la TP. Además, se identifican dos periodos. Se asume que el aporte de agua de la formación se describe con la *ecuación 2.55*:

$$Q_w = C_w(P_r - P_{wf}) \quad 2.55$$

Donde

C_w : coeficiente de producción de agua, [m³/d/MPa]

P_r : presión del yacimiento, [MPa]

P_{wf} : presión de fondo fluyendo, [MPa]

Q_w : producción diaria de agua, [m³/d]

La primera fase es antes de que el émbolo llegue a la superficie, donde se tienen las *ecuaciones 2.56 y 2.57*:

$$P_{wf} = P_{c,av} \cdot e^{CN \cdot prof} \quad 2.56$$

$$H_1(t) = \frac{C_w(P_r - P_{wf})t}{86400 A_t} \quad 2.57$$

Donde

A_t : área transversal interior de la tubería de producción, [m²]

C_w : coeficiente de producción de agua, [m³/d/MPa]

$H_1(t)$: altura del líquido dentro de la TP durante el periodo de apertura para un tiempo dado, [m]

$P_{c,av}$: presión promedio de la tubería de revestimiento, [MPa]

P_r : presión del yacimiento, [MPa]

P_{wf} : presión de fondo fluyendo [MPa]

$prof$: profundidad de asentamiento del resorte de fondo, [m]

t : tiempo, [s]

Al final de la primera fase $t=t_F$ y la altura del líquido se calcula con la ecuación 2.58:

$$H_{1,i} = \frac{C_w(P_r - P_{wf})t_F}{86400 A_t} + \int_0^{t_F} \frac{FB}{A_t} dt \quad 2.58$$

Donde

A_t : área transversal interior de la tubería de producción, [m²]

C_w : coeficiente de producción de agua, [m³/d/MPa]

dt : diferencial de tiempo, [s]

FB : coeficiente de resbalamiento del líquido, [m³/s]

$H_{1,i}$: altura del líquido dentro de la TP al final de la primera fase del periodo de apertura, [m]

P_r : presión del yacimiento, [MPa]

P_{wf} : presión de fondo fluyendo [MPa]

t_F : tiempo en el punto F, [s]

Una vez que el émbolo llega a la superficie y comienza la etapa de producción de gas, la presión en el fondo del pozo se comporta de la siguiente manera:

$$P_{wf} = P_t \cdot e^{CN \cdot prof} + \rho_L g H_1 10^{-6} \quad 2.59$$

Donde

g : aceleración gravitacional, [m/s²]

H_1 : altura del líquido dentro de la TP durante el periodo de apertura, [m]

P_t : presión en la tubería de producción, [MPa]

P_{wf} : presión de fondo fluyendo [MPa]

$prof$: profundidad de asentamiento del resorte de fondo, [m]

ρ_L : densidad del líquido, [kg/m³]

Y la producción de líquido durante esta etapa se representa con la *ecuación 2.60*:

$$Q_w = \frac{d(H_1 A_t)}{dt} = \frac{C_w (P_r - P_{wf})}{86400} \quad 2.60$$

Donde

A_t : área transversal interior de la tubería de producción, [m²]

C_w : coeficiente de producción de agua, [m³/d/MPa]

H_1 : altura del líquido dentro de la TP durante el periodo de apertura, [m]

P_r : presión del yacimiento, [MPa]

P_{wf} : presión de fondo fluyendo, [MPa]

Q_w : producción diaria de agua, [m³/d]

t : tiempo de la segunda fase de apertura cuando el émbolo es retenido en el lubricador, [s]

En la ecuación anterior t es el tiempo de la segunda etapa, por lo tanto al inicio de la segunda etapa $t=0$ y se introducen las siguientes variables.

$$\beta = \frac{C_w \rho_L}{A_t 8.64 \times 10^9} \quad 2.61$$

$$t' = t \cdot \beta \quad 2.62$$

$$H'_1 = \frac{P_t \cdot e^{CN \cdot prof} + \rho_L g H_{1,i} 10^{-6}}{P_r} \quad 2.63$$

$$K = \frac{P_{t,F} \cdot e^{CN \cdot prof} + \rho_L g H_{1,i} 10^{-6}}{P_r} \quad 2.64$$

$$H'_1 = 1 - (1 - K) e^{-t'} \quad 2.65$$

Donde

A_t : área transversal interior de la tubería de producción, [m²]

CN : variable intermedia calculada con la *ecuación 2.32*

C_w : coeficiente de producción de agua, [m³/d/MPa]

g : aceleración gravitacional, [m/s²]

H_l : altura del líquido dentro de la TP durante el periodo de apertura, [m]

H'_l : altura adimensional del líquido dentro de la TP durante el periodo de apertura

$H_{1,i}$: altura del líquido dentro de la TP al final de la primera fase del periodo de apertura, [m]

K : variable intermedia para calcular la altura adimensional del líquido dentro de la TP durante el periodo de apertura

P_r : presión del yacimiento, [MPa]

$prof$: profundidad de asentamiento del resorte de fondo, [m]

P_t : presión en la tubería de producción, [MPa]

P_{tF} : presión en la tubería de producción en el punto F, [MPa]

t : tiempo de la segunda fase de apertura cuando el émbolo es retenido en el lubricador, [s]

t' : tiempo adimensional de la segunda fase de apertura cuando el émbolo es retenido en el lubricador

β : variable intermedia para calcular el tiempo adimensional, [s⁻¹]

ρ_L : densidad del líquido, [kg/m³]

La altura del líquido (H_l), calculada con la *ecuación 2.63*, puede utilizarse para calcular la presión de fondo fluyendo cuando el pistón se encuentra en el lubricador.

Producción de gas durante el periodo de apertura

En esta etapa se distinguen dos periodos distintos, la producción del gas que se encuentra por encima del bache y la purga de gas. La producción de gas que se encuentra por encima del bache se representa con la *ecuación 2.66*.

$$Q_{g1}(t) = \frac{P_t(t)T_s}{P_s T_{avz}} \cdot C \cdot \left[1 - \frac{P_{sp}}{P_t(t)}\right]^{0.5} \quad 2.66$$

Donde

C : coeficiente de rendimiento de la ecuación de contrapresión para el periodo de producción de gas, se obtiene con la *ecuación 2.21*.

P_s : presión en la superficie, [MPa]

P_{sp} : presión en la línea de descarga, [MPa]

$P_t(t)$: presión en la tubería de producción para un tiempo dado, [MPa]

$Q_{g1}(t)$: flujo del gas que se encuentra sobre el bache de líquido para un tiempo dado, [m³/d]

T_{av} : temperatura promedio del pozo, [K]

T_s : temperatura superficial, [K]

z : factor de compresibilidad

El segundo periodo se compone de dos partes. La primera es la purga del gas que no proviene directamente de la formación y la segunda es la purga del gas que proviene directamente de la formación.

$$Q_{g2}(t) = Q_{g2,1}(t) + Q_{g2,2}(t) \quad 2.67$$

Donde

$Q_{g2}(t)$: flujo del gas en el segundo periodo para un tiempo dado, [m³/d]

$Q_{g2,1}(t)$: flujo del gas que no proviene de la formación en el segundo periodo para un tiempo dado, [m³/d]

$Q_{g2,2}(t)$: flujo del gas que proviene de la formación en el segundo periodo para un tiempo dado, [m³/d]

En la ecuación anterior $Q_{g2,1}$ puede calcularse con la *ecuación 2.66* y $Q_{g2,2}$ se obtiene con la *ecuación 2.68*:

$$Q_{g2,2}(t) = C_g [P_r^2 - P_{wf}(t)^2]^n \quad 2.68$$

$$P_{wf}(t) = P_t(t) \cdot e^{CN \cdot (prof - H_1)} + H_1 \rho_L g 10^{-6} \quad 2.69$$

Donde

C_g : coeficiente de producción de gas, [m³/d/MPa²]

g : aceleración gravitacional, [m/s²]

H_L : altura del líquido dentro de la TP durante el periodo de apertura, [m]

n : exponente de la ecuación de contrapresión

P_r : presión del yacimiento, [MPa]

$P_t(t)$: presión en la tubería de producción para un tiempo dado, [MPa]

$P_{wf}(t)$: presión de fondo fluyendo para un tiempo dado, [MPa]

$prof$: profundidad de asentamiento del resorte de fondo, [m]

$Q_{g2,2}(t)$: flujo del gas que proviene de la formación en el segundo periodo para un tiempo dado, [m³/d]

ρ_L : densidad del líquido, [kg/m³]

Para la ecuación anterior H_L se calcula con las *ecuaciones 2.58 a 2.65*. Para calcular el gasto diario de gas, se usa la *ecuación 2.70*:

$$Q_g = \left[\int_0^{t_{CD}} Q_{g1} dt + \int_0^{t_{FG}} Q_{g2,1} dt + \int_0^{t_{FG}} Q_{g2,2} dt \right] N \quad 2.70$$

Donde

dt : diferencial de tiempo

N : número de ciclos diarios, [ciclos/d]

Q_g : gasto diario de gas, [m³/d]

Q_{g1} : flujo del gas que se encuentra sobre el bache de líquido

$Q_{g2,1}$: flujo del gas que no proviene de la formación en el segundo periodo

$Q_{g2,2}$: flujo del gas que proviene de la formación en el segundo periodo

t_{CD} : tiempo del punto C al punto D

t_{FG} : tiempo del punto F al punto G

II.2.2 Modelo dinámico con datos de émbolo inteligente

En 2008, Chava, Falcone y Teodoriu¹² publican un modelo capaz de predecir la operación del pistón viajero de una manera más realista con el fin de optimizar el ciclo del método con ayuda de datos medidos en tiempo real por un émbolo inteligente. Dicho modelo solamente puede implementarse cuando se tienen datos de presión y temperatura medidos con el tiempo para incorporarse en las ecuaciones de conservación de la masa, de momentos y de energía. Por su parte, los avances tecnológicos y los avances en la automatización han logrado mejorar la precisión de los modelos al eliminar asunciones requeridas anteriormente.

Estos autores aprovechan los datos de presión y temperatura medidos por el émbolo viajero y junto con otros datos medidos se alimentan las ecuaciones de un modelo dinámico sin la necesidad de realizar asunciones que limiten la efectividad del modelo. Por lo tanto, se optimiza el ciclo para maximizar la producción.

El presente modelo ofrece dos ventajas sobre los métodos anteriores: (1) considera flujo de dos fases dentro de la TP por debajo del pistón durante la carrera ascendente y (2) considera presión de cabeza del pozo variable. Una de sus limitaciones es que el modelo está dirigido a pozos de gas con problemas de carga de líquidos, donde el único líquido es agua. Asimismo, implica que el espacio anular y el yacimiento contribuyen con energía similar y ambos aportan fluidos a la tubería de producción durante la carrera ascendente pero el nivel del líquido en el espacio anular no llega a la entrada de la TP, es decir, el espacio anular no se vacía de líquido en ningún momento. Además, este modelo asume que existe un resbalamiento de líquido nulo, que el líquido producido es incompresible (densidad y viscosidad constante), y que el líquido y el gas en el espacio anular están separados por una clara interface.

En 2009, los mismos autores presentan una actualización del modelo creado anteriormente para predecir el tamaño del bache, la velocidad y la posición del pistón durante la carrera ascendente, en el que se eliminan algunas de las limitaciones del primer modelo. En la nueva versión toman en cuenta las caídas de presión debido a la gravedad, para esto los autores toman valores promedio de la velocidad del émbolo, la densidad del gas en la cabeza, la densidad del gas en el espacio anular y la densidad de la mezcla, entre otros.

Para realizar el modelo, establecieron cuatro regiones de flujo bien definidas para el sistema como se muestra en la *figura 2.6*: la región 1 es la que se encuentra por encima del bache dentro de la TP y se encuentra llena de gas; la región 2 es la parte interior de la TP por debajo del émbolo; la región 3 es el volumen de gas atrapado en el espacio anular y la región 4 es la que se encuentra debajo del final de la TP.

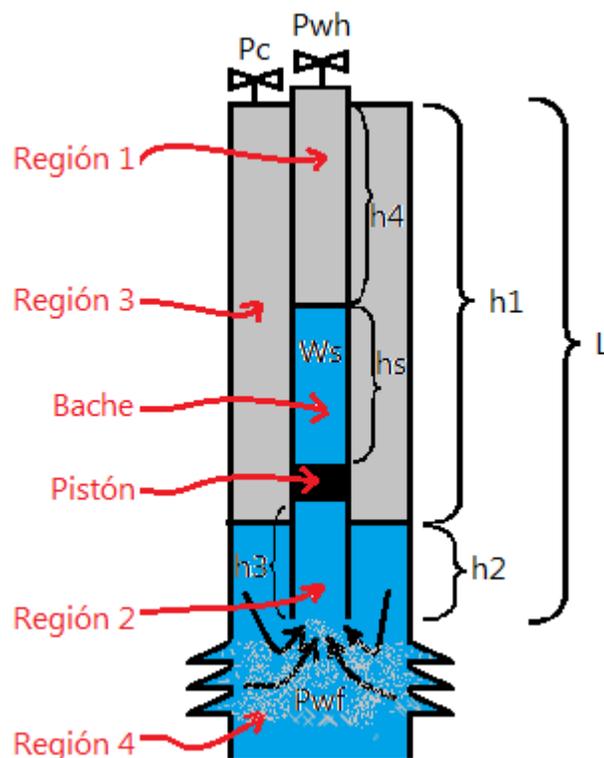


Figura 2.6 Modelo con elementos principales y regiones de flujo

Ecuaciones

Carrera ascendente

Al inicio de la carrera ascendente, el émbolo se encuentra en el fondo de la TP como se muestra en la *figura 2.7*, por lo que la altura del bache puede calcularse a partir de un balance de presiones y será constante debido a que el resbalamiento de líquido es considerado nulo.

$$h_s = \frac{P_{bp} - P_{wh} - \rho_w g h_p - \bar{\rho} g (L - h_p)}{g(\rho_w - \bar{\rho} g)} \quad 2.71$$

Donde

g : aceleración gravitacional, [m/s²]

h_p : altura del pistón, [m]

h_s : altura del bache, [m]

L : longitud de la tubería de producción, [m]

P_{bp} : presión bajo el pistón, [Pa]

P_{wh} : presión de la tubería de producción en la cabeza del pozo, [Pa]

$\bar{\rho}_g$: densidad promedio del gas, [kg/m³]

ρ_w : densidad del agua, [kg/m³]

En la ecuación anterior $\bar{\rho}_g$ está en función del promedio de los valores de presión y temperatura en la cabeza y los valores medidos por el pistón en el fondo.

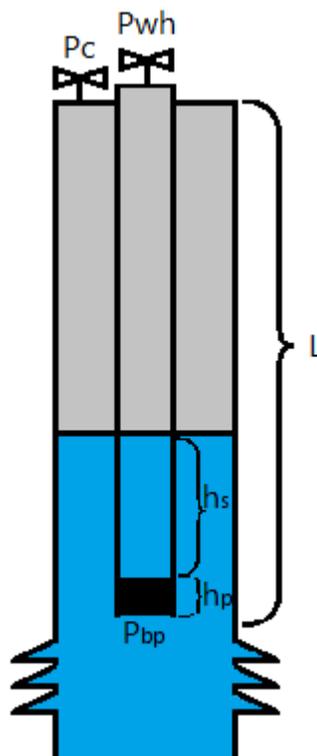


Figura 2.7 Modelo cuando el pistón descansa en el fondo

Durante la carrera ascendente, la masa total que entra en la TP es igual a la suma del líquido aportado por el espacio anular y lo que contribuye la formación, de manera que se tiene la *ecuación 2.72*:

$$\dot{m}_T = \dot{m}_a + \dot{m}_r \quad 2.72$$

Donde

\dot{m}_a : flujo másico proveniente del espacio anular que entra en la TP, [kg/s]

\dot{m}_r : flujo másico proveniente del yacimiento que entra en la TP, [kg/s]

\dot{m}_T : flujo másico total entrando en la TP, [kg/s]

El flujo másico proveniente del espacio anular se calcula con la *ecuación 2.75*:

$$\dot{m}_a = q_{w,a} \rho_w \quad 2.73$$

$$q_{w,a} = \frac{\Delta h_2}{\Delta t} A_a \quad 2.74$$

$$\therefore \dot{m}_a = \left(\frac{\Delta h_2}{\Delta t} A_a \right) \rho_w \quad 2.75$$

Donde

A_a : área transversal del espacio anular, [m²]

\dot{m}_a : flujo másico proveniente del espacio anular que entra en la TP, [kg/s]

$q_{w,a}$: gasto de agua proveniente del espacio anular que entra en la TP, [m³/s]

Δh_2 : cambio en la altura del nivel de líquido en el espacio anular, [m]

Δt : lapso de tiempo, [s]

ρ_w : densidad del agua, [kg/m³]

El flujo másico proveniente del yacimiento es la suma del gas y el líquido aportados por el yacimiento.

$$\dot{m}_r = q_{g,r} (\bar{\rho}_g + x \rho_w) \quad 2.76$$

Donde

\dot{m}_r : flujo másico proveniente del yacimiento que entra en la TP, [kg/s]

$q_{g,r}$: gasto de gas proveniente del yacimiento, [m³/s]

$\bar{\rho}_g$: densidad promedio del gas, [kg/m³]

ρ_w : densidad del agua, [kg/m³]

En la ecuación anterior x es la relación de agua y gas producidos, y el gasto aportado por el yacimiento está dado por la *ecuación 2.77*:

$$q_{g,r} = C(P_r^2 - P_{wf}^2)^n \quad 2.77$$

Donde

C : coeficiente de rendimiento de la ecuación de contrapresión, [m³/d/Pa²]

n : exponente de la ecuación de contrapresión

P_r : presión del yacimiento, [Pa]

P_{wf} : presión de fondo fluyendo, [Pa]

$q_{g,r}$: gasto de gas proveniente del yacimiento, [m³/d]

Así, el flujo másico que entra en la TP se obtiene combinando las *ecuaciones 2.72 a 2.77*.

$$\dot{m}_T = \left(\frac{\Delta h_2}{\Delta t} A_a\right) \rho_w + q_{g,r}(\bar{\rho}_g + x\rho_w) \quad 2.78$$

Donde

A_a : área transversal del espacio anular, [m²]

\dot{m}_T : flujo másico total entrando en la TP, [kg/s]

$q_{g,r}$: gasto de gas proveniente del yacimiento, [m³/s]

x : relación de agua y gas producidos

Δh_2 : cambio en la altura del nivel de líquido en el espacio anular, [m]

Δt : lapso de tiempo, [s]

$\bar{\rho}_g$: densidad promedio del gas, [kg/m³]

ρ_w : densidad del agua, [kg/m³]

La velocidad promedio del pistón se obtiene con un balance de masa en la región 1 en el cual el flujo másico justo por encima del bache es igual al flujo másico en la cabeza del pozo y se obtiene la *ecuación 2.79*:

$$\bar{v}_p = \frac{\bar{q}_{g,wh} \cdot \bar{\rho}_{g,wh}}{A_t \cdot \bar{\rho}_{as}} \quad 2.79$$

Donde

A_t : área transversal interior de la tubería de producción, [m²]

$\bar{q}_{g,wh}$: gasto promedio de gas en la cabeza del pozo, [m³/s]

\bar{v}_p : velocidad promedio del pistón, [m/s]

$\bar{\rho}_{as}$: densidad promedio del gas justo sobre el bache, [kg/m³]

$\bar{\rho}_{g,wh}$: densidad promedio del gas en la cabeza del pozo, [kg/m³]

La posición del émbolo al final de cada periodo de tiempo se puede obtener al calcular la distancia recorrida por el pistón en el periodo de tiempo en cuestión. Para el modelo propuesto al realizarse la carrera ascendente la región 1 (encima del bache) se reduce, mientras la región 2 (debajo del pistón) aumenta, tal y como se muestra en la *figura 2.8*, por lo tanto se tiene la siguiente relación:

$$\Delta h_3 = -\Delta h_4 = \bar{v}_p \cdot \Delta t \quad 2.80$$

Donde

\bar{v}_p : velocidad promedio del pistón, [m/s]

Δh_3 : cambio en la altura de la región bajo el pistón, [m]

Δh_4 : cambio en la altura de la región sobre el bache, [m]

Δt : lapso de tiempo, [s]

Así, la posición del émbolo puede calcularse en función de las alturas de las regiones 1 y 2 tras un periodo de tiempo, recordando que al inicio de la carrera ascendente, es decir para $t_1=0$, la altura de la región 2 es $h_3=0$ y la altura de la región 1 es:

$$h_4(t_1 = 0) = L - h_s - h_p \quad 2.81$$

$$h_3(t_2) = h_3(t_1) + \bar{v}_p \cdot \Delta t \quad 2.82$$

$$h_4(t_2) = h_4(t_1) - \bar{v}_p \cdot \Delta t \quad 2.83$$

Donde

$h_3(t_1)$: altura de la región bajo el pistón al inicio de un periodo de tiempo, [m]

$h_3(t_2)$: altura de la región bajo el pistón al final de un periodo de tiempo, [m]

$h_4(t_1=0)$: altura de la región sobre el bache al inicio de la carrera ascendente, [m]

$h_4(t_1)$: altura de la región sobre el bache al inicio de un periodo de tiempo, [m]

$h_4(t_2)$: altura de la región sobre el bache al final de un periodo de tiempo, [m]

h_p : altura del pistón, [m]

h_s : altura del bache, [m]

L : longitud de la tubería de producción, [m]

\bar{v}_p : velocidad promedio del pistón, [m/s]

Δt : lapso de tiempo, [s]

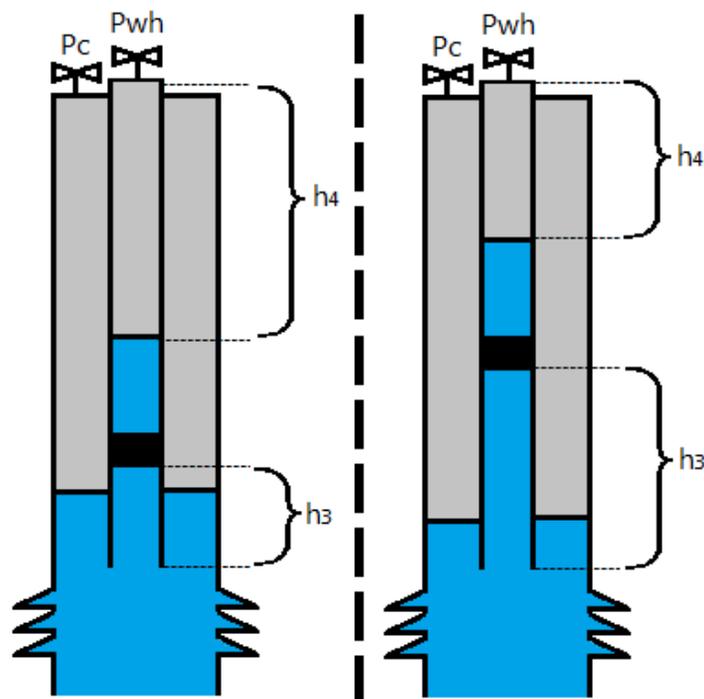


Figura 2.8 Cambio en la altura de las regiones 1 y 2 para un Δt

Otra manera de obtener estos valores es con un análisis de conservación de la masa en el flujo en la cabeza del pozo y justo encima del bache, de la cual se obtiene la *ecuación 2.84* para la altura de la región 1:

$$h_4(t_2) = \frac{P_{wh}(t_2)}{\rho_g g} \left(\frac{q_{wh}(t_2)}{A_t \bar{v}_p} - 1 \right) \quad 2.84$$

Donde

A_t : área transversal interior de la tubería de producción, [m²]

g : aceleración gravitacional, [m/s²]

$h_4(t_2)$: altura de la región sobre el bache al final de un periodo de tiempo, [m]

$P_{wh}(t_2)$: presión de la tubería de producción en la cabeza del pozo al final de un periodo de tiempo, [Pa]

$q_{wh}(t_2)$: gasto de producción en la cabeza del pozo al final de un periodo de tiempo, [m³/s]

\bar{v}_p : velocidad promedio del pistón, [m/s]

ρ_g : densidad del gas, [kg/m³]

El sistema de ecuaciones que describen la carrera ascendente termina con la ecuación de la altura de la región 2:

$$h_3(t_2) = L - [h_4(t_2) + h_s + h_p] \quad 2.85$$

Donde

$h_3(t_2)$: altura de la región bajo el pistón al final de un periodo de tiempo, [m]

$h_4(t_2)$: altura de la región sobre el bache al final de un periodo de tiempo, [m]

h_p : altura del pistón, [m]

h_s : altura del bache, [m]

L : longitud de la tubería de producción, [m]

Otras ecuaciones importantes para describir la carrera ascendente y que ayudan a completar el conjunto de ecuaciones que interpretan lo que sucede son las siguientes:

Con un balance de presiones en el espacio anular se puede calcular la altura del líquido que se encuentra en esta región.

$$h_2 = \frac{P_c - P_{wf} + \overline{\rho_{g,a}} g L}{g(\overline{\rho_{g,a}} - \rho_w)} \quad 2.86$$

Donde

g : aceleración gravitacional, [m/s²]

h_2 : altura del nivel de líquido en el espacio anular, [m]

L : longitud de la tubería de producción, [m]

P_c : presión en la tubería de revestimiento, [Pa]

P_{wf} : presión de fondo fluyendo, [Pa]

$\overline{\rho_{g,a}}$: densidad promedio del gas en el espacio anular, [kg/m³]

ρ_w : densidad del agua, [kg/m³]

La variación del líquido en el espacio anular se obtiene de un balance de masa y de presión entre la región 2 y la región 3:

$$\Delta h_2 = \frac{\Delta P_c - \Delta P_{wf}}{g(\overline{\rho_{g,a}} - \rho_w)} \quad 2.87$$

Donde

g : aceleración gravitacional, [m/s²]

Δh_2 : cambio en la altura del nivel de líquido en el espacio anular, [m]

ΔP_c : cambio en la presión en la tubería de revestimiento, [Pa]

ΔP_{wf} : cambio en la presión de fondo fluyendo, [Pa]

$\overline{\rho_{g,a}}$: densidad promedio del gas en el espacio anular, [kg/m³]

ρ_w : densidad del agua, [kg/m³]

La velocidad del émbolo también se calcula rescribiendo las ecuaciones de balance de masa y presión de la siguiente manera:

$$v_p = \frac{gh_3(t_1)(F_1+F_2)}{A_t[P_{wf}(t_2)-P_{bp}(t_2)]-(F_1+F_2)\Delta t} \quad 2.88$$

$$F_1 = \frac{\Delta P_c - \Delta P_{wf}}{g(\overline{\rho}_{g,a} - \rho_w)\Delta t} \quad 2.89$$

$$F_2 = q_{g,r}(\overline{\rho}_g + x\rho_w) \quad 2.90$$

Donde

A_t : área transversal interior de la tubería de producción, [m²]

g : aceleración gravitacional, [m/s²]

$h_3(t_1)$: altura de la región bajo el pistón al inicio de un periodo de tiempo, [m]

$P_{bp}(t_2)$: presión bajo el pistón al final de un periodo de tiempo, [Pa]

$P_{wf}(t_2)$: presión de fondo fluyendo al final de un periodo de tiempo, [Pa]

$q_{g,r}$: gasto de gas proveniente del yacimiento, [m³/s]

v_p : velocidad del pistón, [m/s]

x : relación de agua y gas producidos

ΔP_c : cambio en la presión en la tubería de revestimiento, [Pa]

ΔP_{wf} : cambio en la presión de fondo fluyendo, [Pa]

Δt : lapso de tiempo, [s]

$\overline{\rho}_g$: densidad promedio del gas en el yacimiento, [kg/m³]

$\overline{\rho}_{g,a}$: densidad promedio del gas en el espacio anular, [kg/m³]

ρ_w : densidad del agua, [kg/m³]

II.2.3 Modelo mecanicista con datos de émbolo inteligente

En 2011, Bello, Falcone, Xu, Scott y Harrod¹³ desarrollan un modelo mecanicista para maximizar desempeño del pistón viajero y reducir sus costos operacionales para incrementar la eficiencia del ciclo. Además, una de sus mayores contribuciones es que presentan un enfoque que no se había tomado en cuenta antes, el caso de que en el arreglo de fondo se tenga empacador.

Este modelo contribuye a seleccionar la mejor estrategia de explotación con base en la presión del yacimiento, el comportamiento de afluencia, la relación gas-agua, los niveles estáticos de producción en la TP y el espacio anular, presiones en la TP y espacio anular, velocidades de la carrera ascendente y descendente, gasto en la cabeza del pozo, propiedades de los fluidos, tipo de terminación, así como los tiempos de producción y de cierre.

De esta manera se toma como base el análisis de Chava *et al.*¹², se modifica y se combinan los datos del pistón inteligente y los datos de producción para alimentar el modelo mecanicista que se presenta a continuación, con datos dinámicos que permitan aumentar la eficiencia.

Ecuaciones

Para pozos sin empacador, durante el primer periodo de tiempo, la masa que entra en la TP es la suma del flujo másico del espacio anular y del yacimiento.

$$\dot{m}_T = \dot{m}_a + \dot{m}_r \quad 2.91$$

Donde

\dot{m}_a : flujo másico proveniente del espacio anular que entra en la TP, [lb/s]

\dot{m}_r : flujo másico proveniente del yacimiento que entra en la TP, [lb/s]

\dot{m}_T : flujo másico total entrando en la TP, [lb/s]

En el caso de pozos con empacador (*figura 2.9*), se crea una forma de U que modifica el enfoque original de Chava *et al.*¹² En este caso, la masa total que entra a la TP, hasta el drene del espacio con forma de U, se define con las *ecuaciones 2.92 a 2.95*:

$$\dot{m}_T = \dot{m}_a \quad 2.92$$

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{bp} \quad 2.93$$

$$\dot{m}_{bp} = \bar{v}_p A_t \rho_w \quad 2.94$$

$$\bar{v}_p = \frac{\bar{q}_{g,wh} \cdot \bar{\rho}_{g,wh}}{A_t \cdot \bar{\rho}_{as}} \quad 2.95$$

Donde

A_t : área transversal interior de la tubería de producción, [pie²]

\dot{m}_a : flujo másico proveniente del espacio anular que entra en la TP, [lb/s]

\dot{m}_{bp} : flujo másico bajo el pistón en la TP, [lb/s]

\dot{m}_T : flujo másico total entrando en la TP, [lb/s]

$\bar{q}_{g,wh}$: gasto promedio de gas en la cabeza, [pie³/s]

\bar{v}_p : velocidad promedio del pistón, [pie/s]

$\bar{\rho}_{as}$: densidad promedio del gas justo por encima del pistón, [lb/pie³]

$\bar{\rho}_{g,wh}$: densidad promedio del gas en la cabeza, [lb/pie³]

ρ_w : densidad del agua, [lb/pie³]

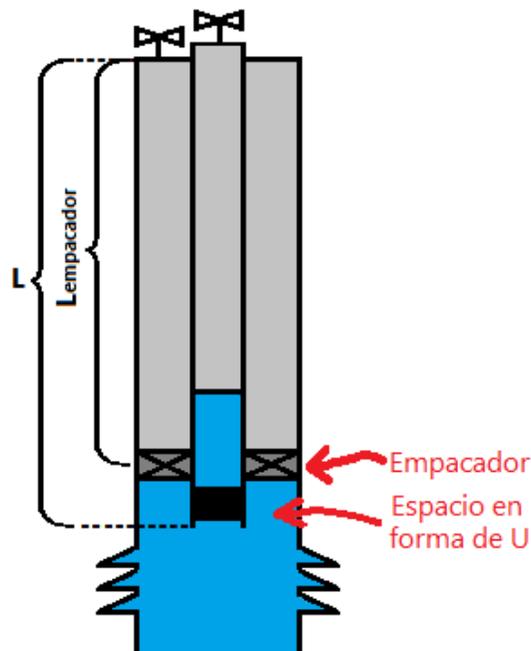


Figura 2.9 Aparejo con empacador

Tras el drene del espacio con forma de U, se tienen las *ecuaciones 2.96 a 2.100*:

$$\dot{m}_T = \dot{m}_r \quad 2.96$$

$$\dot{m}_r = q_{g,r}(\bar{\rho}_g + x\rho_w) \quad 2.97$$

$$\dot{m}_{bp} = \bar{v}_p A_t \rho_m \quad 2.98$$

$$\bar{\rho}_m = \frac{\dot{m}_r}{A_t \cdot \bar{v}_p} \quad 2.99$$

$$x_w = \frac{\rho_m - \rho_g}{\rho_w - \rho_g} \quad 2.100$$

Donde

A_t : área transversal interior de la tubería de producción, [pie²]

\dot{m}_{bp} : flujo másico bajo el pistón en la TP, [lb/s]

\dot{m}_r : flujo másico proveniente del yacimiento que entra en la TP, [lb/s]

\dot{m}_T : flujo másico total entrando en la TP, [lb/s]

$q_{g,r}$: gasto de gas proveniente del yacimiento, [pie³/s]

\bar{v}_p : velocidad promedio del pistón, [pie/s]

x : relación de agua y gas producidos

x_w : fracción másica de líquido dentro de la TP debajo del pistón

ρ_g : densidad del gas, [lb/pie³]

$\bar{\rho}_g$: densidad promedio del gas en el yacimiento, [lb/pie³]

ρ_m : densidad de la mezcla, [lb/pie³]

$\bar{\rho}_m$: densidad promedio de la mezcla, [lb/pie³]

ρ_w : densidad del agua, [lb/pie³]

Toda el agua del área con forma de U debe drenarse antes de que los fluidos del yacimiento puedan entrar en la TP, entonces se tienen las *ecuaciones 2.101 a 2.104*:

$$V_{g,in} = V_{g,r} \quad 2.101$$

$$V_{w,in} = V_{w,r} \quad 2.102$$

$$V_{w,out} = V_{w,bp} \quad 2.103$$

$$V_{w,bp} = \sum_{i=1}^n (A_t \cdot \Delta t \cdot \bar{v}_p) \quad 2.104$$

Donde

A_t : área transversal interior de la tubería de producción, [pie²]

$V_{g,in}$: volumen de gas que entra al pozo, [pie³]

$V_{g,r}$: volumen de gas aportado por el yacimiento, [pie³]

\bar{v}_p : velocidad promedio del pistón, [pie/s]

$V_{w,bp}$: volumen de agua bajo el pistón en la TP, [pie³]

$V_{w,in}$: volumen de agua que entra al pozo, [pie³]

$V_{w,out}$: volumen de agua que entra en la TP, [pie³]

$V_{w,r}$: volumen de agua aportado por el yacimiento, [pie³]

Δt : lapso de tiempo, [s]

El espacio con forma de U queda completamente drenado cuando se cumple que:

$$V_r = V_u \quad 2.105$$

$$V_r = \sum_{i=1}^n (q_{g,r} + xq_{g,r}) \Delta t \quad 2.106$$

$$V_u = (L - L_{empacador}) \cdot A_a \quad 2.107$$

Donde

A_a : área transversal del espacio anular, [pie²]

L : longitud de la tubería de producción, [pie]

$L_{empacador}$: profundidad de asentamiento del empacador, [pie]

$q_{g,r}$: gasto de gas proveniente del yacimiento, [pie³/s]

V_r : volumen de fluidos aportado por el yacimiento, [pie³]

V_u : volumen de fluidos en el espacio con forma de U, [pie³]

x : relación de agua y gas producidos

Δt : lapso de tiempo, [s]

II.2.4 Modelo analítico para el método combinado Pistón Viajero-BNI utilizando tubería flexible

En el mismo año (2011), los autores Bello, Falcone, Xu y Scott¹⁴ establecen un modelo analítico para describir el comportamiento del sistema combinado Émbolo Viajero-Bombeo Neumático Intermitente utilizando tubería flexible (TF) para la inyección del gas.

El principio de funcionamiento de este sistema combinado es inyectar gas a presión por el espacio anular formado entre la tubería flexible y la tubería de producción e instalar el pistón viajero en el interior de la TF. Así, el desempeño de este sistema híbrido depende de condiciones como el gasto de inyección de gas, la presión de inyección del gas, el tipo de terminación y las velocidades de ascenso y descenso, entre otras.

El presente modelo, toma en cuenta una configuración que no se había previsto con anterioridad. En estudios preliminares del sistema combinado Pistón Viajero-BNI, el gas a presión era inyectado por el espacio anular entre la TR y la TP, pero en este caso se inyecta por el espacio anular entre la TP y la TF mientras que el gas aportado por la formación es producido continuamente por el espacio anular entre la TR y la TP. Un esquema del sistema se muestra en la *figura 2.10* en donde se pueden apreciar los elementos más importantes.

Para el análisis de este modelo se definen cuatro etapas del ciclo: (1) cierre, (2) inyección de gas e incremento de presión, (3) descarga de líquido y (4) purga de gas.

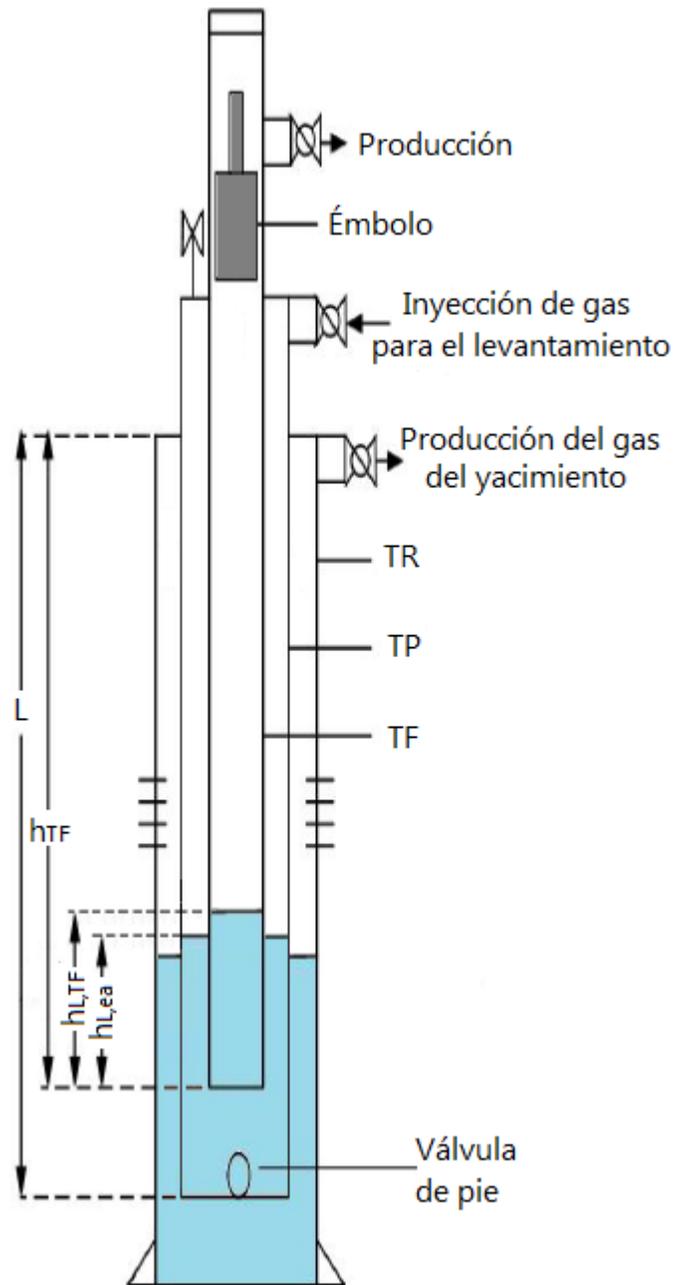


Figura 2.10 Esquema del modelo con elementos principales

Durante la etapa de cierre, la válvula motora permanece cerrada, el flujo se ve interrumpido y el pistón cae libremente desde la superficie hasta el resorte de fondo al final de la TF en donde la válvula de pie permanece abierta permitiendo el paso del líquido que se acumula para formar el bache como lo muestra la *figura 2.11*. El nivel del líquido puede ser calculado o asumido. Para calcularlo, se necesita conocer la cantidad de líquido que ha pasado por la válvula de pie durante la carrera descendente. Este dato puede obtenerse si se conoce la diferencial de

presión a través de la válvula, el tiempo de la carrera descendente y el flujo de líquido del yacimiento al pozo. Para asumirlo, debe conocerse la capacidad de levantamiento deseada y, a partir de la presión en la cabeza y la carga estática, puede calcularse la presión estática en el fondo de la TF. El tiempo de la carrera ascendente se calcula a partir de un valor promedio constante de caída que depende del tipo de pistón que se utilice.

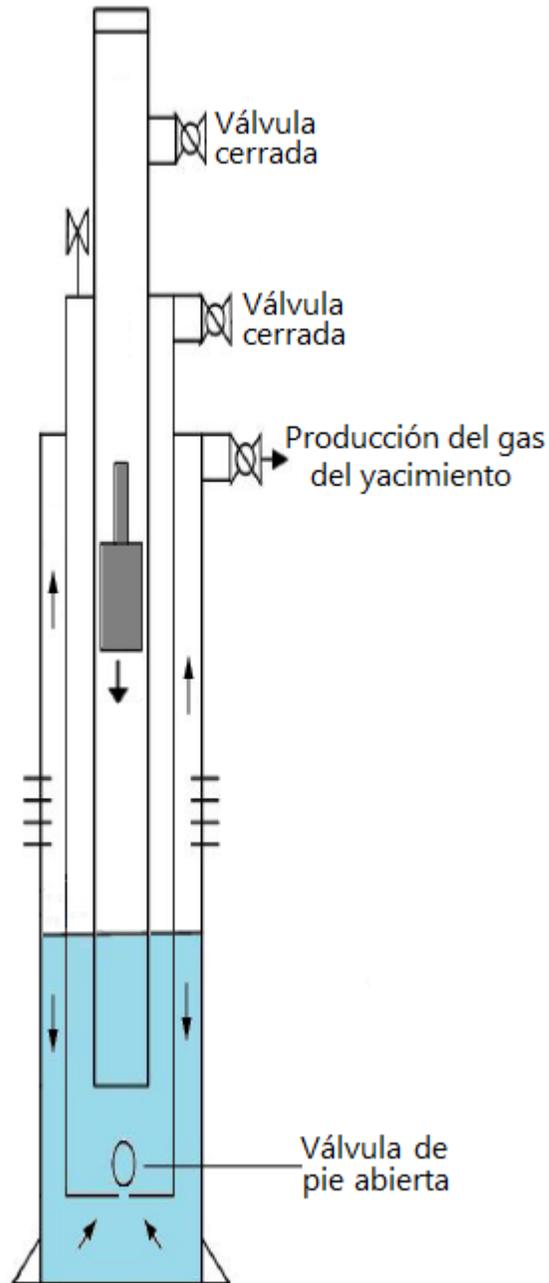


Figura 2.11 Etapa de cierre

La *figura 2.12* muestra el momento en que el pistón llega al fondo de la TF, se cierra la válvula de pie y la etapa de incremento de presión comienza con una presión del sistema que aumenta conforme se inyecta gas a presión por el espacio anular entre la TF y la TP hasta alcanzar una presión deseada. Durante esta etapa se asume que el nivel de líquido permanece constante aunque se sabe que en realidad el incremento de presión en el espacio anular TP-TF desplaza el nivel de líquido hacia abajo y ese desplazamiento se refleja también en el interior de la TF subiendo proporcionalmente.

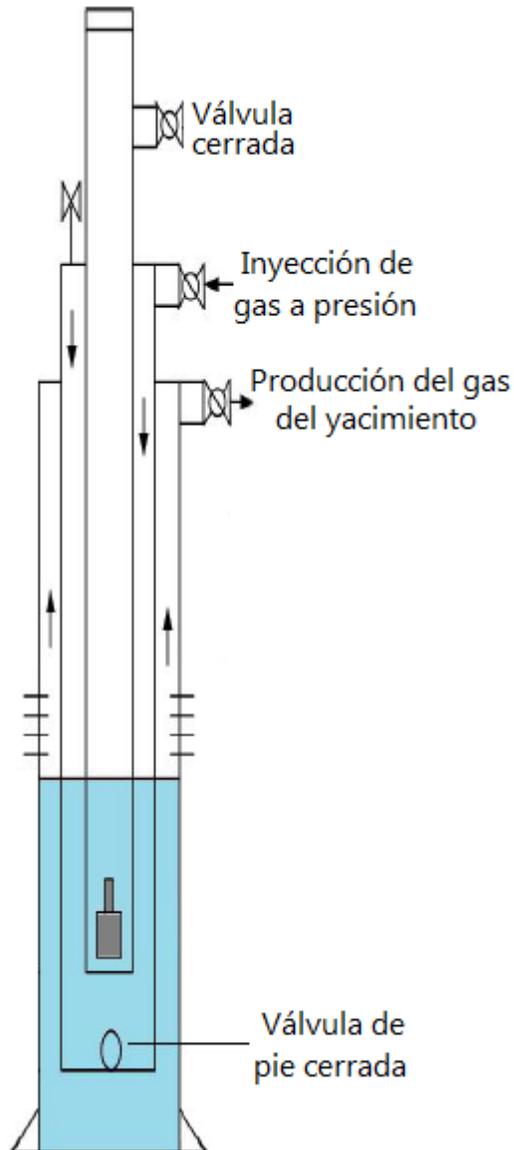


Figura 2.12 Fin de la carrera descendente

La etapa de descarga de líquido o carrera ascendente comienza con el cierre de la válvula de inyección. Al alcanzarse la presión de inyección deseada, la válvula

motora se abre, el gas a presión acumulado en el espacio anular TP-TF se expande promoviendo el flujo ascendente en el interior de la TF y el levantamiento de los líquidos acumulados asociados a este fenómeno. Se asume que la válvula de pie permanece cerrada durante toda esta etapa como puede observarse en la *figura 2.13*.

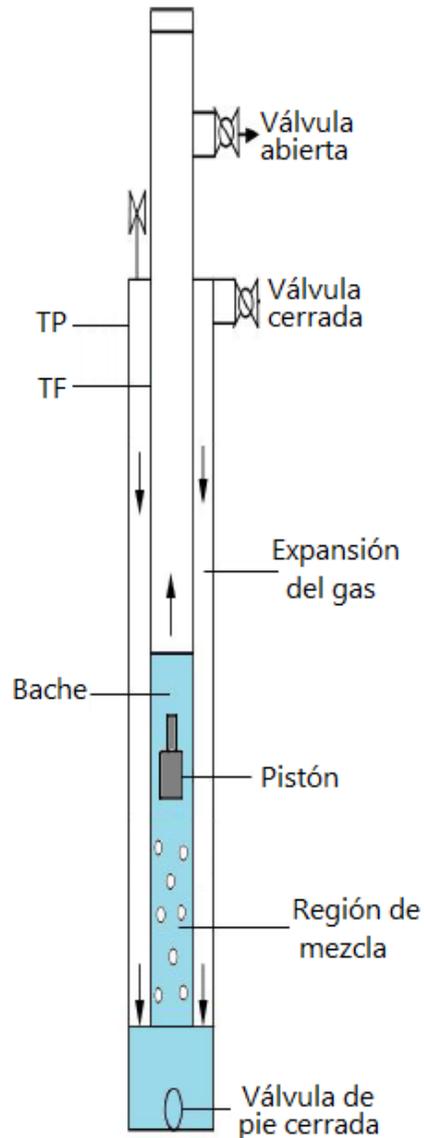


Figura 2.13 Etapa de apertura

La llegada del pistón a la superficie indica el término de la etapa de descarga y el comienzo de la etapa de purga de gas, etapa en la cual se produce gas mientras que la presión desciende hasta alcanzar un cierto valor predeterminado. En ese momento, la válvula motora se cierra y la válvula de pie se abre, permitiendo el flujo de líquido al interior de la TF y al espacio anular TP-TF.

El modelo asume que la mezcla contiene un gas real y que fluye en estado estacionario; que la temperatura es constante a lo largo de la tubería; que el nivel del líquido depende de la capacidad de levantamiento deseada; que la válvula de pie permanece cerrada durante la carrera ascendente; que el contacto gas-líquido es plano; que existe una mezcla homogénea de líquido y gas en la región 2; que la mezcla de la región 2 es incompresible; que el yacimiento aporta fluidos constantemente; que la velocidad de la carrera descendente es considerada constante con base en datos de campo medidos por un émbolo inteligente; que todos los disparos fueron modelados como un conjunto equivalente de disparos; y que la válvula de pie abre cuando la presión de la mezcla debajo de la válvula es tal que la caída de presión a través de la válvula es igual a la mínima caída de presión establecida para abrir la válvula.

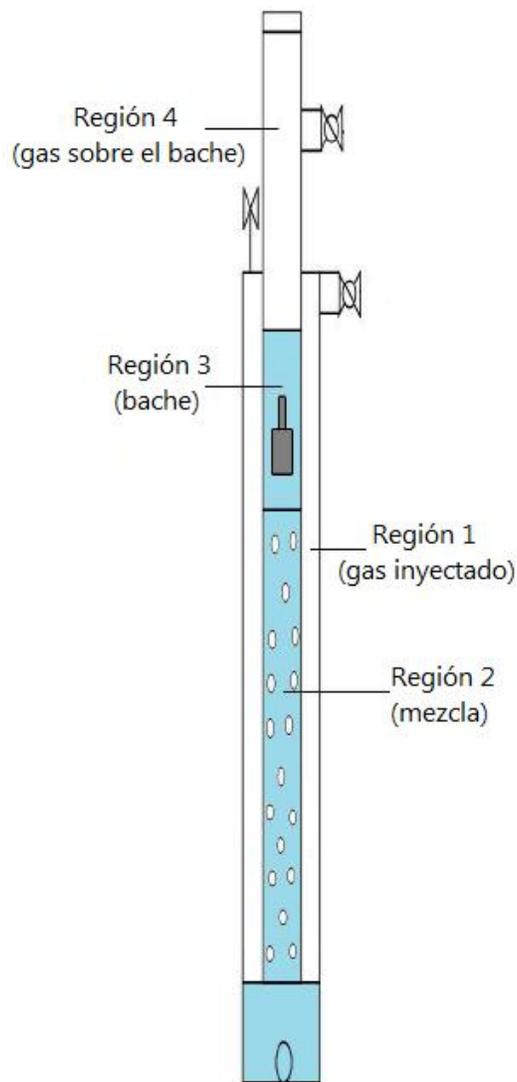


Figura 2.14 Regiones en el sistema TP-TF

Ecuaciones

La presión estática del fondo se puede calcular con las *ecuaciones 2.108 a 2.111*:

$$P_{ws,TF} = P_{wh} + \rho_L g h_{L,TF} + \rho_g g h_{g,TF} \quad 2.108$$

$$P_{ws,ea} = P_{g,iny} + \rho_L g h_{L,ea} + \rho_g g h_{g,ea} \quad 2.109$$

$$h_{g,TF} = h_{TF} - h_{L,TF} \quad 2.110$$

$$h_{g,ea} = h_{TF} - h_{L,ea} \quad 2.111$$

Donde

g : aceleración gravitacional, [pie/s²]

$h_{g,ea}$: altura del gas en el espacio anular TP-TF, [pie]

$h_{g,TF}$: altura del gas dentro de la tubería flexible, [pie]

$h_{L,ea}$: altura del líquido en el espacio anular TP-TF, [pie]

$h_{L,TF}$: altura del líquido dentro de la tubería flexible, [pie]

h_{TF} : altura de la tubería flexible, [pie]

$P_{g,iny}$: presión del gas de inyección, [lb/pg²]

P_{wh} : presión en la cabeza, [lb/pg²]

$P_{ws,ea}$: presión de fondo estática en el espacio anular TP-TF, [lb/pg²]

$P_{ws,TF}$: presión de fondo estática al interior de la tubería flexible, [lb/pg²]

ρ_g : densidad del gas, [lb/pie³]

ρ_L : densidad del líquido, [lb/pie³]

Para calcular el volumen diferencial de gas antes y después de la expansión en el sistema con forma de U, se hace un balance de materia:

$$\sum_{i=1}^n \dot{m}_{in,i} = \sum_{i=1}^n \dot{m}_{out,i} \quad 2.112$$

Donde

\dot{m}_{in} : flujo másico que entra al espacio en forma de U, [lb/s]

\dot{m}_{out} : flujo másico que sale del espacio en forma de U, [lb/s]

i : número de nodo

La relación entre el flujo másico diferencial y la caída de presión diferencial puede describirse de la siguiente manera:

$$\Delta\dot{m} = f(\Delta P) \quad 2.113$$

Para calcular la diferencia de volumen debido a la expansión del gas inyectado en el espacio anular de una alta presión a una baja presión se calcula con la ecuación del gas real:

$$V_{HP} = \frac{z_{HP}RT_s}{P_{HP}} \quad 2.114$$

$$V_{LP} = \frac{z_{LP}RT_s}{P_{LP}} \quad 2.115$$

Donde

P_{HP} : presión alta, [lb/pg²]

P_{LP} : presión baja, [lb/pg²]

R : constante universal = 10.7316 [pie³lb/pg² / °R]

T_s : temperatura del sistema, [°R]

V_{HP} : volumen a alta presión, [pie³]

V_{LP} : volumen a baja presión, [pie³]

z_{HP} : factor de compresibilidad a alta presión

z_{LP} : factor de compresibilidad a baja presión

Todo el líquido en el espacio con forma de U debe drenarse antes de que el gas a presión inyectado en el espacio anular TP-TF entre en el interior de la TF como se aprecia en la *figura 2.15*. Los factores de compresibilidad Z se calculan usando la correlación de Hall y Yarborough.

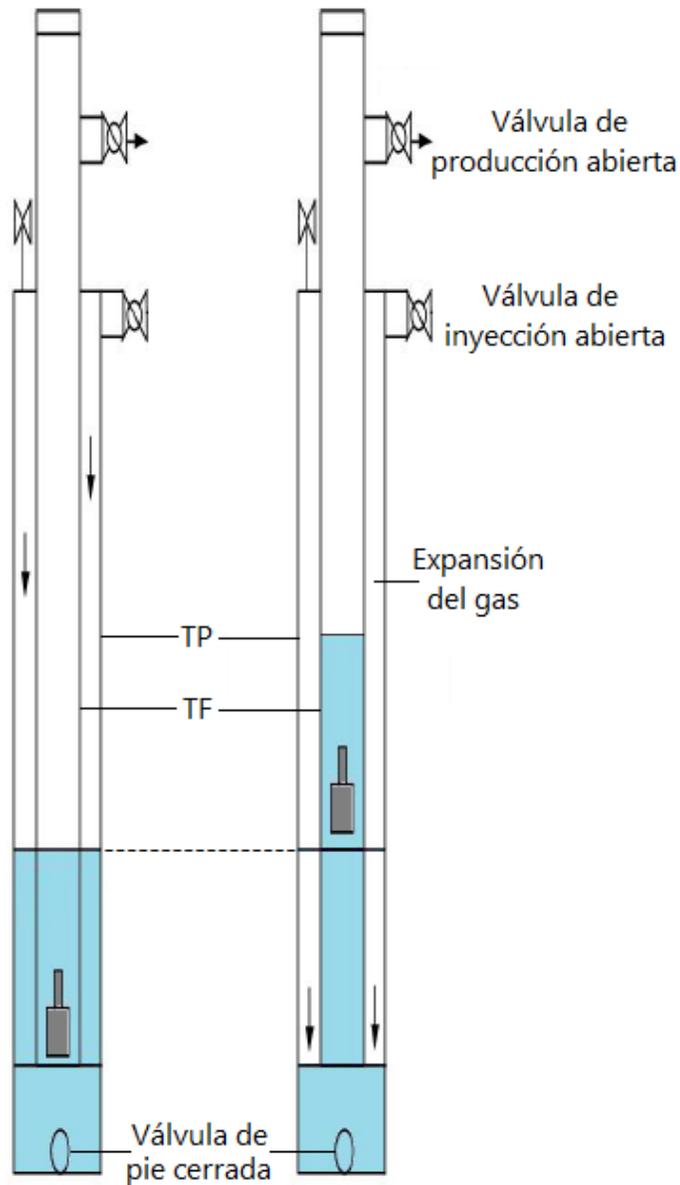


Figura 2.15 Drene del espacio con forma de U

La contribución del gas almacenado en el espacio anular al levantamiento de los líquidos se obtiene de la siguiente manera:

$$\Delta V_{g,ea} = V_{w,out} \quad 2.116$$

$$V_{w,out} = V_{w,bp} \quad 2.117$$

Por lo tanto:

$$\Delta V_{g,ea} = V_{w,bp} \quad 2.118$$

Donde

$V_{w,bp}$: volumen de agua bajo el pistón en la TF, [pie³]

$V_{w,out}$: volumen de agua que sale del espacio anular TP-TF y entra en la TF, [pie³]

$\Delta V_{g,ea}$: expansión del gas en el espacio anular TP-TF, [pie³]

Además:

$$V_{w,bp} = \frac{\pi}{4} (d_{TP}^2 - D_{TF}^2) \Delta h_{ea} \quad 2.119$$

$$\Delta V_{w,TF} = (h_{L,TF} + \Delta h) \frac{\pi d_{TF}^2}{4} = \Delta h_{TF} \cdot \frac{\pi d_{TF}^2}{4} \quad 2.120$$

$$\Delta V_{g,TF} = (h_{TF} - \Delta h_{TF} - h_p) \cdot \frac{\pi d_{TF}^2}{4} \quad 2.121$$

Donde

D_{TF} : diámetro externo de la tubería flexible, [pie]

d_{TF} : diámetro interno de la tubería flexible, [pie]

d_{TP} : diámetro interno de la tubería de producción, [pie]

$h_{L,TF}$: altura del líquido en la tubería flexible, [pie]

h_p : altura del pistón, [pie]

h_{TF} : altura de la tubería flexible, [pie]

$V_{w,bp}$: volumen de agua bajo el pistón en la TF, [pie³]

Δh : cambio en la altura del líquido por el agua desplazada dentro de la TF, [pie]

Δh_{ea} : cambio en la altura del líquido por el agua desplazada en el espacio anular TP-TF, [pie]

Δh_{TF} : cambio de altura del líquido en la tubería flexible, [pie]

$\Delta V_{g,TF}$: cambio en el volumen de gas en la TF, [pie³]

$\Delta V_{w,TF}$: cambio en el volumen de agua en la TF, [pie³]

Para cumplir los requerimientos de levantamiento, la presión en el fondo debe satisfacer la *ecuación 2.122*:

$$P_{wfi} = [(\rho_g g h_{TF} + P_{g,iny}) - \Delta P] - \rho_m g h_m - \rho_g g (h_{TF} - h_p - \Delta h - h_{L,TF}) \quad 2.122$$

Donde

g : aceleración gravitacional, [pie/s²]

$h_{L,TF}$: altura del líquido en la tubería flexible, [pie]

h_m : altura de la mezcla, [pie]

h_p : altura del pistón, [pie]

h_{TF} : altura de la tubería flexible, [pie]

$P_{g,iny}$: presión del gas de inyección, [lb/pg²]

P_{wfi} : presión de fondo fluyendo en la boca de la TF, [lb/pg²]

Δh : cambio de altura del líquido, [pie]

ΔP : caída de presión, [lb/pg²]

ρ_g : densidad del gas, [lb/pie³]

ρ_m : densidad de la mezcla, [lb/pie³]

En la ecuación anterior, Δh es el cambio en la altura adicional relacionado al cambio de presión ΔP y a la densidad de la mezcla ρ_m .

La fracción de volumen de gas depende de los volúmenes calculados anteriormente.

$$H_g = \frac{V_{g,TF}}{V_{g,TF} + V_{w,TF}} \quad 2.123$$

Donde

H_g : fracción de volumen de gas en la TF

$V_{g,TF}$: volumen de gas en la TF, [pie³]

$V_{w,TF}$: volumen de agua en la TF, [pie³]

El pozo se encuentra completamente drenado cuando se cumple la siguiente condición:

$$P_{wfi} = P_{wh} \quad 2.124$$

Donde

P_{wh} : presión en la cabeza del pozo

P_{wfi} : presión de fondo fluyendo en la boca de la TF

Las ecuaciones 2.125 y 2.126 son para verificar que la válvula de pie permanece cerrada durante la carrera ascendente:

$$P_{sv} = P_{wfi} + \rho_L g(L - h_{TF}) \quad 2.125$$

$$\Delta P_{val} = P_{wf} - P_{sv} \quad 2.126$$

Si:

$$\Delta P_{val} \geq \Delta P_{min} \quad \therefore \text{la válvula está abierta.}$$

$$\Delta P_{val} \leq \Delta P_{min} \quad \therefore \text{la válvula está cerrada.}$$

Donde

g : aceleración gravitacional, [pie/s²]

h_{TF} : altura de la tubería flexible, [pie]

L : longitud de la tubería de producción, [pie]

P_{sv} : presión sobre la válvula, [lb/pg²]

P_{wf} : presión de fondo fluyendo bajo la válvula, [lb/pg²]

P_{wfi} : presión de fondo fluyendo en la boca de la TF, [lb/pg²]

ΔP_{min} : caída de presión mínima para mantener la válvula abierta, [lb/pg²]

ΔP_{val} : caída de presión a través de la válvula, [lb/pg²]

ρ_L : densidad del líquido, [lb/pie³]

El flujo másico de gas se puede calcular a partir de las presiones de cabeza durante la purga de gas y la presión de la línea de descarga con la *ecuación 2.127*:

$$\dot{m}_{g,bd} = C_o \sqrt{\frac{(P_{wh,bd} - P_{ld})P_{wh,bd}}{T_s}} \quad 2.127$$

Donde

C_o : coeficiente del orificio de la válvula

$\dot{m}_{g,bd}$: flujo másico de gas durante la purga de gas, [lb/s]

P_{ld} : presión de la línea de descarga, [lb/pg²]

$P_{wh,bd}$: presión en la cabeza durante la purga de gas, [lb/pg²]

T_s : temperatura del sistema, [°F]

La velocidad del gas durante la purga se obtiene con la *ecuación 2.128*:

$$v_{g,bd} = \frac{\dot{m}_{g,bd}}{\rho_{g,bd} \cdot A_{TF}} \quad 2.128$$

$$A_{TF} = \frac{\pi}{4} (d_{TF})^2 \quad 2.129$$

Donde

A_{TF} : área transversal interior de la tubería flexible, [pie²]

d_{TF} : diámetro interno de la tubería flexible, [pie]

$\dot{m}_{g,bd}$: flujo másico de gas durante la purga de gas, [lb/s]

$v_{g,bd}$: velocidad del gas durante la purga de gas, [pie/s]

$\rho_{g,bd}$: densidad del gas durante la purga de gas, [lb/pie³]

La velocidad de la carrera ascendente considera que no se presenta condensación, que es un proceso isotérmico. Los fluidos del espacio anular TP-TF sólo fluyen hacia el interior de la TF y el bache no arrastra gas en él. Además, se asume que el bache y el pistón viajan a la misma velocidad que puede calcularse con la *ecuación 2.130*:

$$v_p = \frac{(e^{\sqrt{k_2} \Delta t} - 1) \sqrt{k_4}}{(e^{\sqrt{k_2} \Delta t} + 1) \sqrt{k_2}} \quad 2.130$$

$$k_1 = \frac{144 \cdot g_c \cdot A_{TF} \cdot (P_{bp} - P_{sp})}{m_{ps}} \quad 2.131$$

$$k_2 = \frac{6 \cdot f_s \cdot \rho_L \cdot h_{L,TF} \cdot A_{TF}}{m_{ps} \cdot d_{TF}} \quad 2.132$$

$$k_3 = \frac{F_{DP} \cdot g_c}{m_{ps}} \quad 2.133$$

$$k_4 = k_1 - g - k_3 \quad 2.134$$

Donde

A_{TF} : área transversal interior de la tubería flexible, [pie²]

d_{TF} : diámetro interno de la tubería flexible, [pie]

F_{DP} : fuerza de interacción pistón-pared de la TF, [lbf]

f_s : factor de fricción del bache

g : aceleración gravitacional, [pie/s²]

g_c : factor de corrección de unidades,

$h_{L,TF}$: altura del líquido dentro de la tubería flexible, [pie]

m_{ps} : masa del bache y el pistón, [lb_m]

P_{bp} : presión bajo el pistón, [lb/pg²]

P_{sp} : presión sobre el pistón, [lb/pg²]

v_p : velocidad del pistón, [pie/s]

Δt : lapso de tiempo, [s]

ρ_L : densidad del líquido, [lb/pie³]

Para calcular el tiempo total del ciclo, se suman los tiempos de cada una de las etapas que lo conforman como se muestra a continuación:

$$t_{ciclo} = t_{CD} + t_{iny} + t_{CA} + t_{bd} \quad 2.135$$

En donde cada componente se calcula como se muestra en las *ecuaciones 2.136 a 2.141*:

$$t_{CD} = 1.1 \left(\frac{h_{TF}}{v_{CD}} \right) \quad 2.136$$

$$t_{iny} = \frac{h_{TF}}{v_{g,iny}} \quad 2.137$$

$$v_{g,iny} = \frac{q_{g,iny} B_g}{A_{ea}} \quad 2.138$$

$$A_{ea} = \frac{\pi}{4} (d_{TP}^2 - D_{TF}^2) \quad 2.139$$

$$t_{CA} = \frac{h_{TF}}{v_{CA}} \quad 2.140$$

$$t_{bd} = \frac{h_{TF}}{v_{g,bd}} \quad 2.141$$

Donde

A_{ea} : área transversal del espacio anular TP-TF, [pie²]

B_g : factor de volumen del gas, [pie³/pie³]

D_{TF} : diámetro externo de la tubería flexible, [pie]

d_{TP} : diámetro interno de la tubería de producción, [pie]

h_{TF} : altura de la tubería flexible, [pie]

$q_{g,iny}$: gasto de inyección del gas, [pie³/s]

t_{bd} : tiempo del periodo de purga de gas, [s]

t_{CA} : tiempo de la carrera ascendente, [s]

t_{CD} : tiempo de la carrera descendente, [s]

t_{ciclo} : tiempo del ciclo, [s]

t_{iny} : tiempo de duración de la inyección de gas, [s]

v_{CA} : velocidad de la carrera ascendente, [pie/s]

v_{CD} : velocidad de la carrera descendente, [pie/s]

$v_{g,ba}$: velocidad del gas durante el periodo de purga de gas, [pie/s]

$v_{g,iny}$: velocidad de inyección del gas, [pie/s]

Lista de figuras

Figura 2.1 Resbalamiento del líquido según el tipo de pistón. WHITE, G. M. *Combining the Technologies of Plunger Lift and Intermittent Gas Lift*. Presented at the Annual American Institute Pacific Coast Joint-Chapter Meeting Costa Mesa, 1981.

Figura 2.2 Curvas de presiones en la TP y TR en un pozo con pistón viajero. TANG, Y. y LIANG, Z. *A New Method of Plunger Lift Dynamic Analysis and Optimal Design for Gas Well Deliquification*. SPE 116764, 2008.

Figura 2.3 Fuerzas y parámetros de la carrera descendente. ANG, Y. y LIANG, Z. *A New Method of Plunger Lift Dynamic Analysis and Optimal Design for Gas Well Deliquification*. SPE 116764, 2008.

Figura 2.4 Fuerzas y parámetros de la carrera ascendente. TANG, Y. y LIANG, Z. *A New Method of Plunger Lift Dynamic Analysis and Optimal Design for Gas Well Deliquification*. SPE 116764, 2008.

Figura 2.5 Acumulación de líquido. TANG, Y. y LIANG, Z. *A New Method of Plunger Lift Dynamic Analysis and Optimal Design for Gas Well Deliquification*. SPE 116764, 2008.

Figura 2.6 Modelo con elementos principales y regiones de flujo.

Figura 2.7 Modelo cuando el pistón descansa en el fondo.

Figura 2.8 Cambio en la altura de las regiones 1 y 2 para un Δt .

Figura 2.9 Aparejo con empacador.

Figura 2.10 Esquema del modelo con elementos principales. BELLO, O.; FALCONE, G.; Xu, J. y Scott, S. *Performance Evaluation of a Plunger Assisted Intermittent Gas Lift System*. SPE 141251, 2011.

Figura 2.11 Etapa de cierre. BELLO, O.; FALCONE, G.; Xu, J. y Scott, S. *Performance Evaluation of a Plunger Assisted Intermittent Gas Lift System*. SPE 141251, 2011.

Figura 2.12 Fin de la carrera descendente. BELLO, O.; FALCONE, G.; Xu, J. y Scott, S. *Performance Evaluation of a Plunger Assisted Intermittent Gas Lift System*. SPE 141251, 2011.

Figura 2.13 Etapa de apertura. BELLO, O.; FALCONE, G.; Xu, J. y Scott, S. *Performance Evaluation of a Plunger Assisted Intermittent Gas Lift System*. SPE 141251, 2011.

Figura 2.14 Regiones en el sistema TP-TF. BELLO, O.; FALCONE, G.; Xu, J. y Scott, S. *Performance Evaluation of a Plunger Assisted Intermittent Gas Lift System*. SPE 141251, 2011.

Figura 2.15 Drene del espacio con forma de U. BELLO, O.; FALCONE, G.; Xu, J. y Scott, S. *Performance Evaluation of a Plunger Assisted Intermittent Gas Lift System*. SPE 141251, 2011.

Referencias

1. FOSS, D. L. y GAUL, R. B. *Plunger – Lift Performance Criteria With Operating Experience – Ventura Avenue Field*. Drilling and Production Practices, API, 1965.
2. HACKSMA, J. D. *Users Guide to Predicting Plunger Lift Performance*. The Southwestern Petroleum Short Course, Lubbock, 1972.
3. ABERCROMBIE, B. "Plunger Lift", *The technology of artificial lift methods*. Volumen 4, BROWN, K. E. (ed.), 1984.
4. LEA, J. F. *Dynamic Analysis of Plunger Lift Operations*. Journal of Petroleum Technology 2616-2629, 1982.
5. WHITE, G. M. *Combining the Technologies of Plunger Lift and Intermittent Gas Lift*. Presented at the Annual American Institute Pacific Coast Joint-Chapter Meeting Costa Mesa, 1981.
6. SCHMIDT, Z.; DOTY, D. R.; LUKONG, P.; FERNANDEZ, O. F. y BRILL, J. P. *Hydrodynamic Model For intermittent Gas Lifting of Viscous Oil*. Journal of Petroleum Technology 475-485, 1982.
7. MARCANO, L. y CHACÍN, J. *Mechanistic Design of Conventional Plunger-Lift Installation*. Intevep S.A., SPE Advanced Technology Series, Vol. 2, No. 1; SPE 23682, 1992.
8. CHACÍN, J.; SCHMIDT, Z. y DOTY, D. *Modeling and Optimization of Plunger Lift Assisted Intermittent Gas Lift Installations*. SPE 23683, 1994.
9. GASBARRI, S. y WIGGINS, M. L. *A Dynamic Plunger Lift Model for Gas Wells*. SPE 37422, 1997.
10. TANG, Y. y LIANG, Z. *A New Method of Plunger Lift Dynamic Analysis and Optimal Design for Gas Well Deliquification*. SPE 116764, 2008.
11. MOWER, L. W.; LEA, J. F.; BEAUREGARD, E. y FERGUSON, P. L. *Defining the Characteristics and Performance of Gas Lift Plungers*. SPE 14344, 1985.

12. CHAVA, G. K.; FALCONE, G. y TEODORIU, C. *Development of a New Plunger-Lift Model Using Smart Plunger Data*. SPE 115934, 2008.
13. BELLO, O.; FALCONE, G.; XU, J.; SCOTT, S. y HARROD, J. *Evaluation of Liquid Loading in the Pinedale Field: Integration of Smart Plunger Data and Mechanistic Modeling*. SPE 141250, 2011.
14. BELLO, O.; FALCONE, G.; XU, J. y SCOTT, S. *Performance Evaluation of a Plunger Assisted Intermittent Gas Lift System*. SPE 141251, 2011.

CAPÍTULO III

APLICACIÓN DE NUEVOS MODELOS PARA EL ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL PISTÓN VIAJERO



Los nuevos modelos matemáticos que permiten comprender el funcionamiento y el desempeño del pistón viajero deben, en algún punto, probar su efectividad para ser aceptados. Así, este capítulo presenta ejemplos de aplicación de algunos nuevos modelos que permiten verificar su efectividad en el campo, para optimizar o predecir el funcionamiento del método, garantizando así que su uso es confiable.

A lo largo de este capítulo se muestran aplicaciones reales de los modelos que los autores correspondientes consideran pertinentes para demostrar la validez de su trabajo. Se presentan los datos necesarios para la implementación de los modelos¹ y posteriormente se muestran los resultados arrojados por el modelo para finalmente compararlos con los datos reales y verificar que coinciden, demostrar que el ciclo opera de manera óptima o, en su defecto, demostrar que no se está maximizando la eficiencia del método y proponer una solución al problema.

III.1 Aplicación del modelo dinámico

Para obtener resultados óptimos al aplicar el modelo dinámico propuesto por Tang y Liang¹, debe tenerse presente el objetivo de la aplicación del método. Es decir, debe decidirse si se desea maximizar la producción de gas, la producción de líquidos o el número de ciclos por día, ya que frecuentemente no son resultados que van de la mano. Sin embargo, un requisito que debe cumplirse para optimizar el funcionamiento del método es que el émbolo realice las carreras ascendente y descendente por completo.

Para la optimización del ciclo existen cuatro escenarios críticos con base en las presiones máximas y mínimas que pueden considerarse para el diseño. La *figura 3.1* muestra la producción de gas por la TP correspondiente a los cambios de presión en la tubería de producción (P_t); además, se distinguen claramente los periodos de cierre y de apertura. El volumen producido de gas se divide en dos: el volumen de gas que se encuentra sobre el bache (V_{g1}) y el volumen de gas que se encuentra debajo del bache (V_{g2}). En cuanto comienza el periodo de apertura, comienza la producción del gas que se encuentra sobre el bache (V_{g1}) debido a que éste comienza a expandirse y a fluir hacia la línea de descarga mientras la presión en la TP cae hasta su valor mínimo donde se mantiene por un tiempo. Cuando el bache llega a la superficie, la presión en la TP comienza a incrementar y cuando alcanza su valor máximo comienza a descender. A partir de ese momento, si se tiene contemplado el periodo de purga de gas, comienza la producción del

¹ En el apéndice se muestra una tabla con los datos requeridos para aplicar cada modelo.

gas que se encuentra debajo del bache (V_{g2}), al tiempo que el émbolo es mantenido en el lubricador.

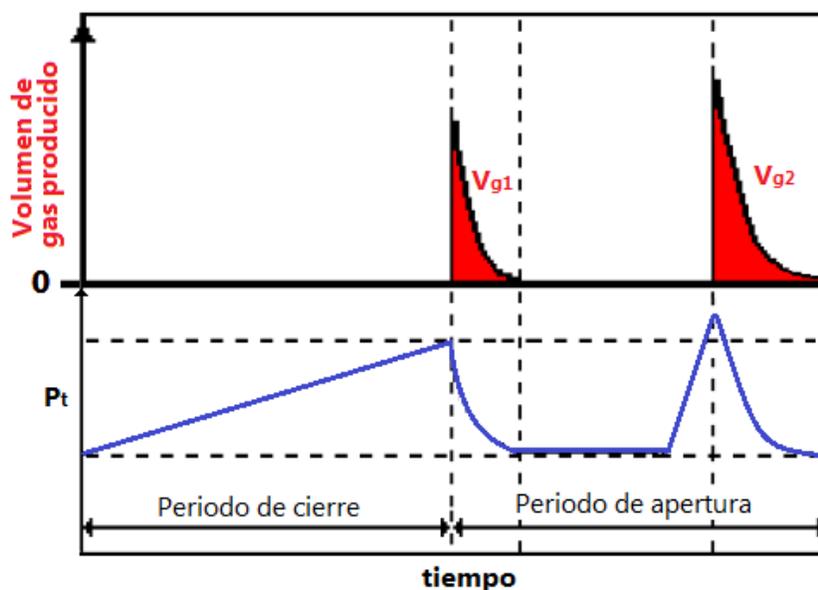


Figura 3.1 Producción de gas correspondiente a la presión en la TP

Así, el primer escenario, mostrado en la *figura 3.2*, considera que el pozo se cerrará hasta alcanzar las presiones máximas de TP ($P_{t,max}$) y TR ($P_{c,max}$) en superficie, para posteriormente permanecer abierto hasta alcanzar las presiones mínimas ($P_{t,min}$ y $P_{c,min}$) permisibles en ambas tuberías. Bajo estas condiciones se obtiene el ciclo de mayor duración.

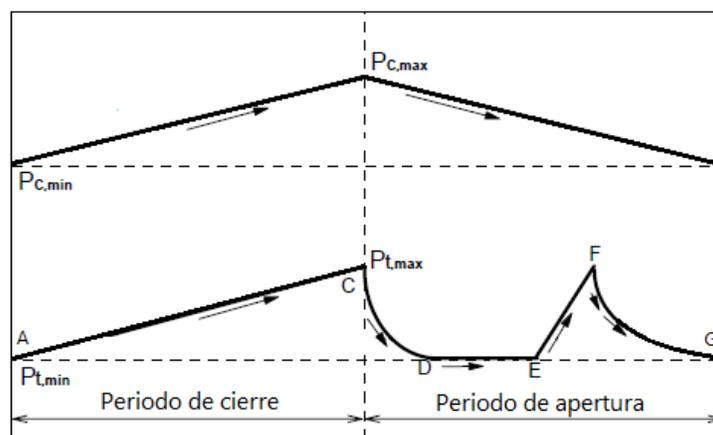


Figura 3.2 Escenario 1 de optimización

En el segundo escenario (*figura 3.3*), el pozo es cerrado hasta una cierta presión establecida, menor a la máxima. Posteriormente se abre hasta alcanzar la presión mínima. En este escenario, la duración del ciclo es menor a la del primero.

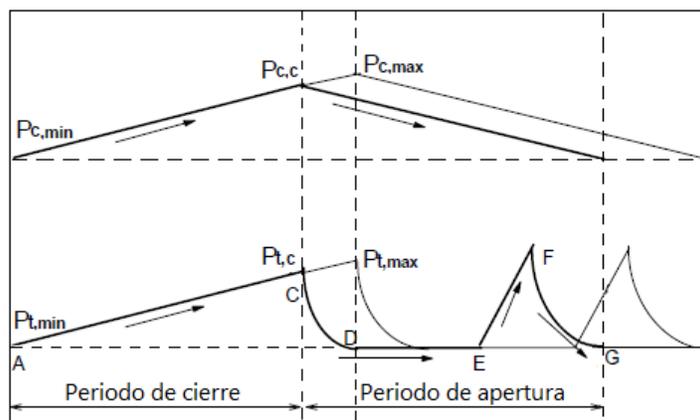


Figura 3.3 Escenario 2 de optimización

El tercer escenario alcanza las presiones críticas superiores, es decir, las máximas permisibles durante el periodo de cierre, pero, a diferencia de los primeros dos escenarios, esta vez no se alcanzan las presiones mínimas durante el periodo de apertura. En el esquema de la *figura 3.4* puede apreciarse con claridad este escenario, en el cual se establecen las presiones más bajas que se alcanzarán durante el ciclo. La duración de este escenario es menor a la del primer escenario.

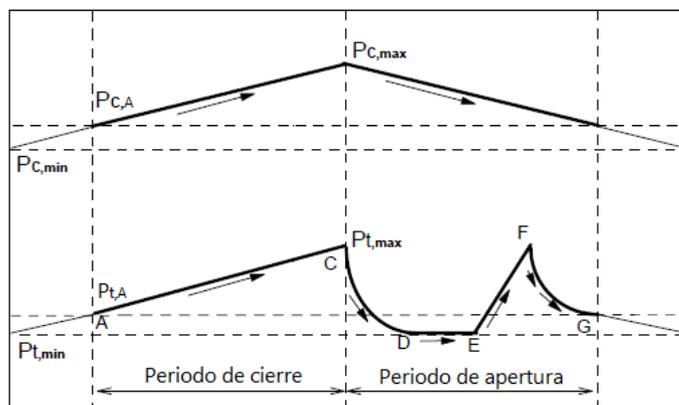
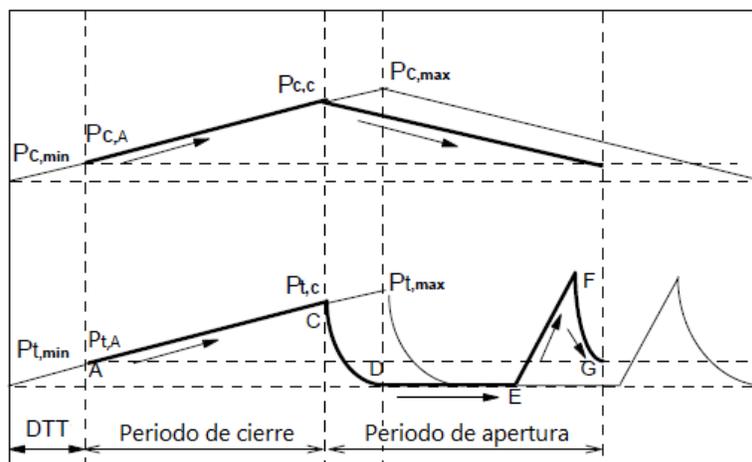


Figura 3.4 Escenario 3 de optimización

Por último, tenemos el cuarto escenario, en el cual no necesariamente se alcanzan las presiones críticas. En este caso se preestablecen presiones de trabajo que no tienen que alcanzar en ningún momento la máxima ni la mínima en los periodos de cierre y apertura respectivamente. En este escenario se pueden obtener distintas duraciones de ciclo e incluso se puede lograr el ciclo más corto para maximizar el número de ciclos por día. La *figura 3.5* muestra este escenario.


Figura 3.5 Escenario 4 de optimización

Antes de realizar un diseño, debe realizarse una prueba de cierre y apertura al pozo para obtener información básica necesaria como la presión máxima, la mínima y los tiempos correspondientes que permitirán conocer las limitaciones del pozo. Para calcular los coeficientes de resistencia del émbolo y validar el modelo, se requiere realizar una prueba de campo para la adquisición de datos del émbolo viajero. En caso de que se tuviera información de pruebas realizadas a pozos vecinos, no se requiere repetir dicha prueba, ya que puede utilizarse la información de pozos vecinos con buena precisión.

El modelo fue validado con datos de un pozo de gas en el campo Sichuan en China. Los datos de entrada para el modelo fueron los mostrados en la *tabla 3.1* y se realizó la simulación con base en el primer escenario de optimización.

dt (m)	0.062	C_g	39.537
D_t (m)	0.073	n_g	1.188
d_c (m)	0.127	$P_{c,min}$ (MPa)	6.8
Prof (m)	2668	$P_{t,min}$ (MPa)	1.2
m (kg)	6.8	t_B (s)	900
T_{wh} (K)	313	$P_{t,B}$ (MPa)	2.1
T_{av} (K)	353	$P_{c,max}$ (MPa)	7.3
P_r (MPa)	15	$P_{t,max}$ (MPa)	2.7
γ_g	0.637	t_c (s)	3300
ρ_L (kg/m ³)	1056	t_{OP} (s)	1380
RGL (m ³ /m ³)	1214	P_{sp} (MPa)	1
C_w (m ³ /d/MPa)	6.977		

Tabla 3.1 Datos introducidos al modelo

Donde

dt: diámetro interno de la tubería de producción

D_t : diámetro externo de la tubería de producción

d_c : diámetro interno de la tubería de revestimiento

Prof: profundidad de asentamiento del resorte de fondo

m: masa del pistón

T_{wh} : temperatura de la tubería de producción en la cabeza del pozo	$P_{t,min}$: presión mínima en la tubería de producción
T_{av} : temperatura promedio del pozo	t_B : tiempo al punto B
P_r : presión del yacimiento	$P_{t,B}$: presión en la tubería de producción en el punto B
γ_g : densidad específica del gas	$P_{c,max}$: presión máxima en la tubería de revestimiento
ρ_L : densidad del líquido	$P_{t,max}$: presión máxima en la tubería de producción
RGL: relación gas-líquido	t_c : tiempo al punto C, tiempo del periodo de cierre
C_w : coeficiente de producción de agua	t_{op} : tiempo del periodo de apertura
C_g : coeficiente de producción de gas	P_{sp} : presión en la línea de descarga
n_g : exponente de la ecuación de contrapresión	
$P_{c,min}$: presión mínima en la tubería de revestimiento	

El tiempo que le toma al líquido llegar a la superficie fue ajustado con los cuatro coeficientes de resistencia y finalmente se obtuvo $t_{CE}=460$ s. El tiempo medido de producción de líquido obtenido es $t_{ES}=120$ s. Se midió el tiempo aproximado de la carrera descendente y se obtuvo un resultado de 1320 s, mientras que el tiempo de la carrera descendente que el émbolo cae por el gas es de 870 s.

De acuerdo a los datos anteriores se obtuvieron los siguientes coeficientes de resistencia para el pozo: $\lambda_{gd}=700$, $\lambda_{ld}=1885$, $\lambda_{lu}=0$ y $\lambda_{2u}=1160$.

Los resultados obtenidos con los datos anteriores se muestran en la *tabla 3.2* y en las *figuras 3.6* y *3.7*.

Escenario 1			
tc (s)	3300	top (s)	1380
$P_{c,max}$ (MPa)	7.3	$P_{t,max}$ (MPa)	2.7
$P_{c,min}$ (MPa)	6.8	$P_{t,min}$ (MPa)	1.2
Q_g (m ³ /d)	14789	Q_l (m ³ /d)	19

Tabla 3.2 Resultados del modelo para el escenario 1

Tras analizar los resultados del modelo y compararlos con los datos medidos en campo se concluye que el modelo arroja una predicción satisfactoria, ya que el modelo predijo un gasto de gas de $14,789 \text{ m}^3/\text{d}$ y en campo se midió una producción de gas de $14,640 \text{ m}^3/\text{d}$, lo que significa que el modelo sobrepredijo en un 1.01% dicho valor. Para el valor de líquido también se tuvo un buen cálculo, aunque menos preciso. El modelo predijo $19 \text{ m}^3/\text{d}$ y en campo se midieron $17.1 \text{ m}^3/\text{d}$, por lo que la sobreestimación en este caso fue de 11.11%.

La *figura 3.6* muestra una gráfica de posición (X_{PL}) y velocidad (V_{PL}) contra el tiempo durante la carrera ascendente. En este gráfico puede observarse que el émbolo sufre un fuerte incremento en su velocidad al principio de la carrera; a continuación viene un periodo estable en el que sigue incrementando con una pendiente definida y poco pronunciada, resultado del resbamiento del líquido. La etapa final se manifiesta con un súbito decremento en la velocidad que se presenta cuando el bache llega a la superficie y aumenta la fricción local en la cabeza. Posteriormente, se da un incremento vertiginoso en la velocidad debido a que el bache comienza a producirse y la carga de líquido disminuye.

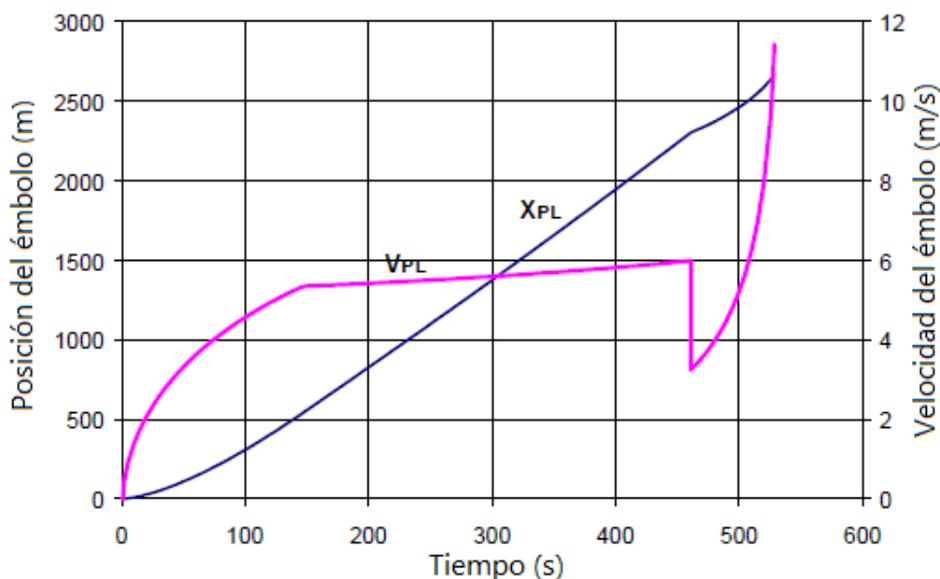


Figura 3.6 Resultados del modelo para la carrera ascendente utilizando el primer escenario

La *figura 3.7* muestra un gráfico de posición (X_{PL}) y velocidad (V_{PL}) contra el tiempo para la carrera descendente. En este caso, la velocidad del émbolo incrementa de forma continua mientras cae libremente por el gas. Cuando llega al líquido, el pistón reduce de manera notable su velocidad para después incrementar lentamente antes de llegar al fondo.

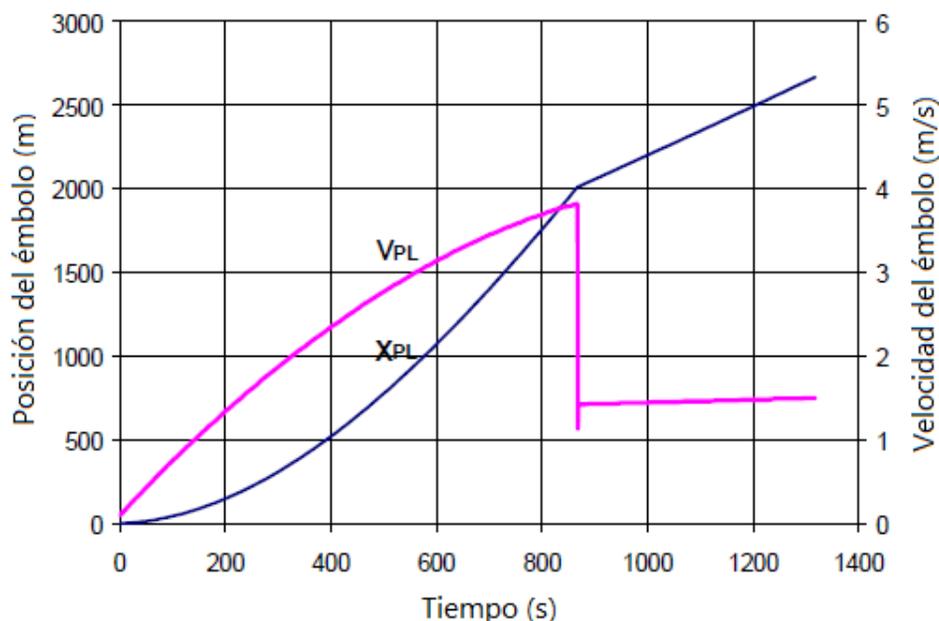


Figura 3.7 Resultados del modelo para la carrera descendente utilizando el primer escenario

Posteriormente, se realizó una simulación con los mismos datos, pero bajo el segundo escenario. Los datos de los coeficientes de resistencia se consideran constantes sin importar el escenario que se esté utilizando, pero el tiempo de producción del bache (t_{ES}) se obtiene por medio de un proceso iterativo. A continuación, se propone un valor para el periodo de cierre (t_c), se calculan las correspondientes presiones en la TP y la TR ($P_{t,c}$ y $P_{c,c}$). Una vez obtenidos estos datos se procede a correr el modelo para verificar que el pistón realice las carreras ascendente y descendente por completo. Tras varios cálculos, se identifica el tiempo mínimo requerido para que esto suceda como $t_c=2600$ segundos y su correspondiente $t_{OP}=1088$ segundos; además, se observa que al incrementar t_c la producción de gas disminuye. Por lo tanto, $t_c=2600$ segundos es la mejor opción para el segundo escenario. Los resultados se muestran a continuación en la *tabla 3.3*.

Escenario 2			
t_c (s)	2600	t_{OP} (s)	1088
$P_{c,max}$ (MPa)	7.19	$P_{t,max}$ (MPa)	2.53
$P_{c,min}$ (MPa)	6.8	$P_{t,min}$ (MPa)	1.2
Q_g (m ³ /d)	16227	Q_l (m ³ /d)	29

Tabla 3.3 Resultados del modelo para el escenario 2

A continuación, se realizó una simulación para el tercer escenario, de manera parecida al segundo escenario, optimizando t_c para maximizar la producción de gas, y se obtuvieron los resultados mostrados en la *tabla 3.4*, donde se puede observar que la mejor opción es la número 4.

Escenario 3			
Opción 1			
t_c (s)	850	t_{OP} (s)	355
$P_{c,max}$ (MPa)	7.3	$P_{t,max}$ (MPa)	2.7
$P_{c,min}$ (MPa)	7.17	$P_{t,min}$ (MPa)	2.49
Q_g (m ³ /d)	12631	Q_l (m ³ /d)	34
Opción 2			
t_c (s)	1150	t_{OP} (s)	480
$P_{c,max}$ (MPa)	7.3	$P_{t,max}$ (MPa)	2.7
$P_{c,min}$ (MPa)	7.13	$P_{t,min}$ (MPa)	2.41
Q_g (m ³ /d)	17970	Q_l (m ³ /d)	31
Opción 3			
t_c (s)	1450	t_{OP} (s)	606
$P_{c,max}$ (MPa)	7.3	$P_{t,max}$ (MPa)	2.7
$P_{c,min}$ (MPa)	7.08	$P_{t,min}$ (MPa)	2.34
Q_g (m ³ /d)	19951	Q_l (m ³ /d)	29
Opción 4			
t_c (s)	1750	t_{OP} (s)	732
$P_{c,max}$ (MPa)	7.3	$P_{t,max}$ (MPa)	2.7
$P_{c,min}$ (MPa)	7.03	$P_{t,min}$ (MPa)	2.26
Q_g (m ³ /d)	20477	Q_l (m ³ /d)	27
Opción 5			
t_c (s)	2050	t_{OP} (s)	857
$P_{c,max}$ (MPa)	7.3	$P_{t,max}$ (MPa)	2.7
$P_{c,min}$ (MPa)	6.99	$P_{t,min}$ (MPa)	2.19
Q_g (m ³ /d)	20241	Q_l (m ³ /d)	26.3

Tabla 3.4 Resultados del modelo para el escenario 3

Finalmente, para el cuarto escenario se utiliza el siguiente procedimiento de diseño:

1. Asumir un valor de DTT como en la *figura 3.5*.
2. Asumir un valor de t_c y calcular t_{OP} .
3. Correr el modelo para verificar que el pistón realiza por completo ambas carreras.

4. Repetir los pasos 2 y 3 hasta encontrar el menor valor posible de t_C y su correspondiente t_{OP} .
5. Incrementar gradualmente t_C observando el comportamiento de producción de fluidos.
6. Asumir distintos valores para DTT y repetir los pasos 2 a 5.
7. Comparar los resultados y encontrar el diseño que mejor se ajuste a las necesidades. Por ejemplo: máxima producción de gas, mínima producción de líquidos, etc.

En este caso el mejor resultado obtenido con este escenario es el mismo que con el escenario 3. En consecuencia, la mejor opción de los cuatro escenarios y las múltiples opciones que algunos de ellos presentan es la obtenida en el escenario 3, opción 4. Lo que significa que cuando el pozo permanece cerrado hasta la presión máxima permisible de 7.3 MPa y 2.7 MPa, para la TR y TP respectivamente, y después se abre hasta alcanzar 7.03 MPa y 2.26 MPa, se obtiene la máxima producción de gas con 20,477 m³/d.

III.2 Aplicación de modelo dinámico con datos de émbolo inteligente

Una característica del modelo presentado en 2008 por Chava, Falcone y Teodoriu² es la facilidad con que puede programarse. Otra de sus características es que al implementarse correctamente se cumple que la región por encima del pistón es cero cuando éste se encuentra en superficie. Además, el comportamiento del pozo debe ser replicable aún cuando algunos datos conocidos sean tomados como incógnitas en vez de ser tomados como datos de entrada.

Utilizando una base de datos de un campo en el este de Texas, se obtuvieron datos medidos por un émbolo inteligente con intervalos de cinco segundos por un lapso de tres días, datos de presión de fondo fluyendo (P_{wf}) y temperatura de fondo (T_{fondo}), medidos con la misma frecuencia, presiones en superficie de TP y TR, gasto superficial de gas y características de la TP y la TR.

Como los datos proporcionados no eran suficientes para implementar el modelo, algunos datos debieron ser estimados. Por ejemplo, para la altura del pistón se propuso la medida más común; el volumen de agua que aportaba el yacimiento se calculó con información de campo, pero es un dato que puede modificarse para ajustar el modelo; la presión del yacimiento fue calculada con los incrementos de presión de los periodos de cierre y también es un dato que puede modificarse para ajustar el modelo; los parámetros "C" y "n" de la ecuación de contrapresión se estimaron con datos de campos análogos; las propiedades de los fluidos como densidad, viscosidad, compresibilidad y factor de volumen debieron

ser calculadas para lo que se asumió una densidad específica y a partir de este dato se obtuvieron los demás con correlaciones.

Dado que los datos de campo no estaban tomados con la misma frecuencia, se determinó ajustarlos a intervalos de dos minutos y a partir de estos datos se interpoló para utilizar intervalos de diez segundos en el modelo.

Con los datos de campo se elaboró una gráfica (*figura 3.8*) de presión y gasto de gas contra el tiempo, en la que se tienen la presión de fondo fluyendo (P_{wf}), la presión medida por el pistón inteligente (P_{bp}), la presión en la cabeza del pozo (P_t) y la presión superficial en la TR (P_c). La grafica muestra dos ciclos antes de estabilizarse y tres ciclos fácilmente identificables una vez que las condiciones se han estabilizado.

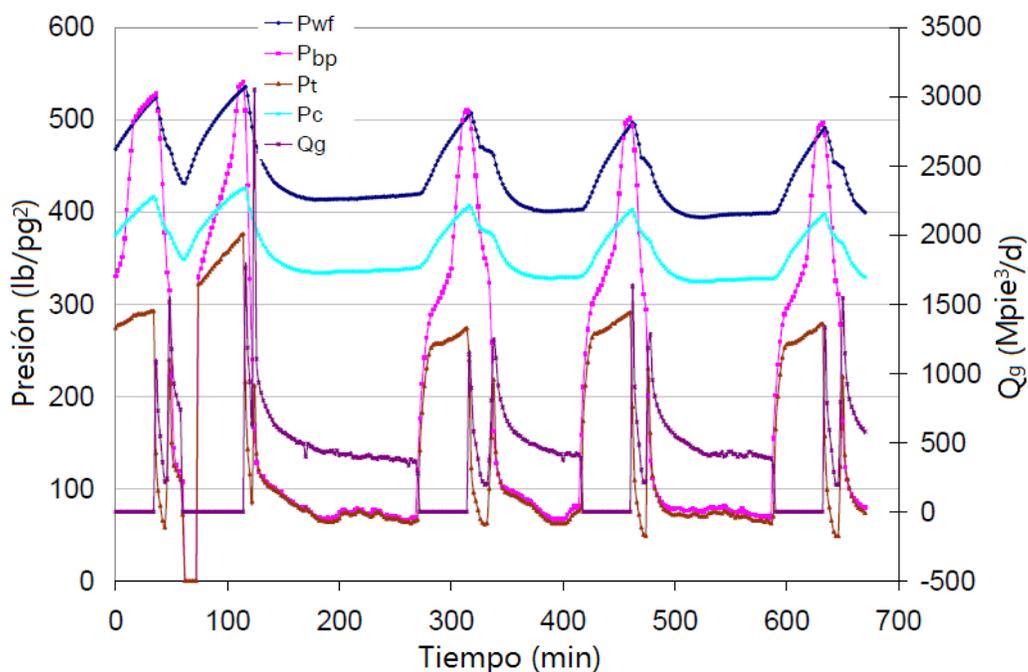


Figura 3.8 Datos de campo disponibles para el modelo

La *figura 3.9* muestra el periodo de apertura de un solo ciclo de la figura anterior para apreciarlo más en detalle. El tiempo comienza desde cero con las presiones más altas del sistema. Al comenzar el periodo de apertura, las presiones comienzan a caer y la presión medida por el émbolo inteligente pasa de ser igual a la presión de fondo al inicio de la carrera ascendente, a ser igual a la presión en la cabeza durante el periodo de purga. Las líneas punteadas mostradas con color rojo señalan el momento en que el bache y el pistón llegan a la superficie. Una vez que el émbolo llega a la superficie comienza el periodo de purga de gas, en el cual las presiones alcanzan su mínimo y se mantienen en este valor hasta el final del periodo de purga.

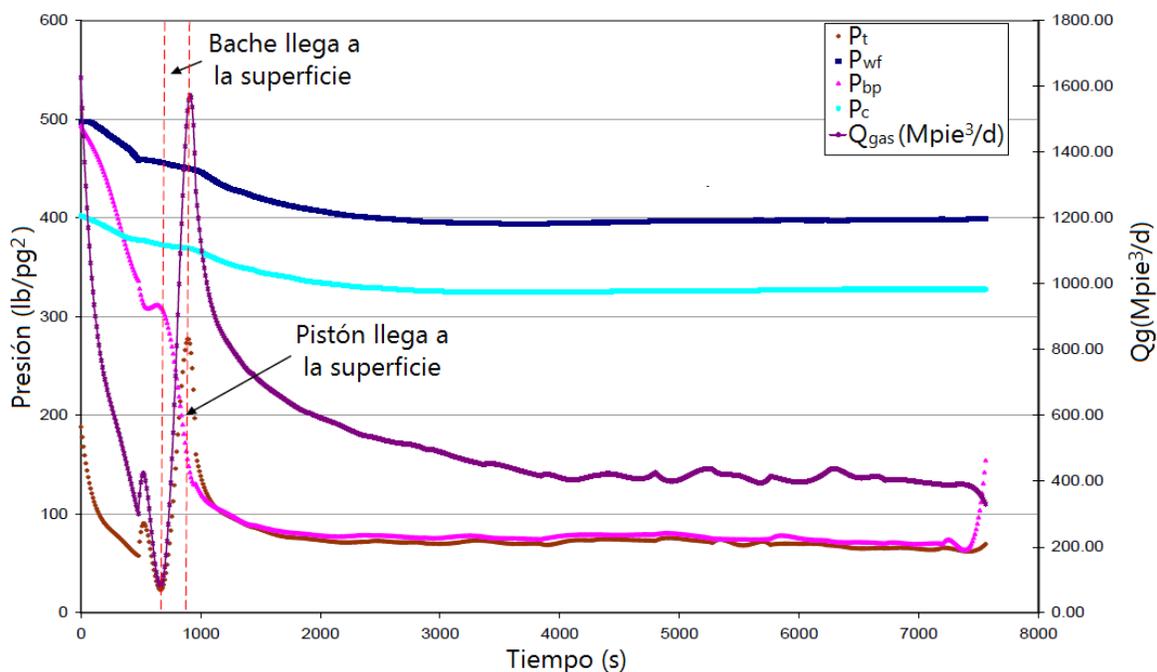


Figura 3.9 Datos de campo disponibles del periodo de apertura para un solo ciclo

Los resultados de la simulación al implementar el modelo se muestran a continuación. La *figura 3.10* muestra el perfil de velocidad calculado por el modelo de 2008 para la carrera ascendente. En ella se puede observar que el modelo predice de manera intermitente el valor de la velocidad con algunos valores negativos. Esto sucede a consecuencia de que, para facilitar el análisis del método, se asume un flujo en estado estacionario que conlleva a valores fuera de la realidad. Ésta es una muestra de una limitación del modelo.

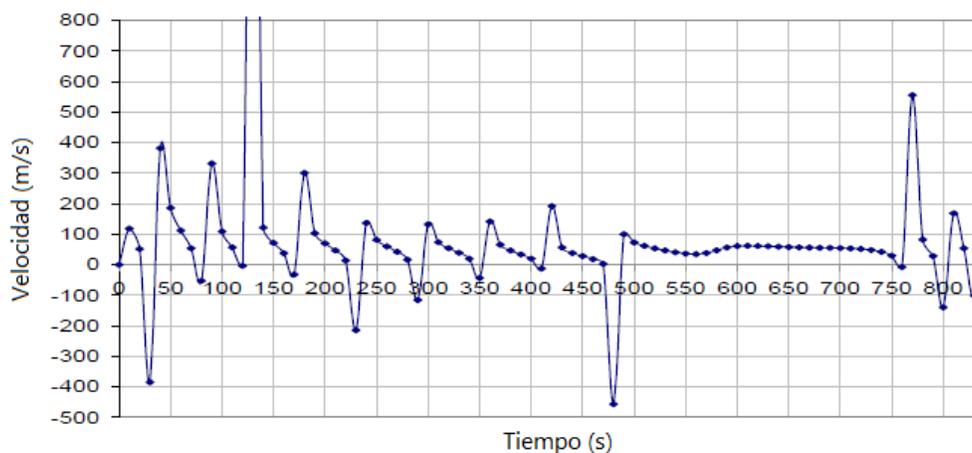


Figura 3.10 Perfil de velocidades del pistón calculado por el modelo para la carrera ascendente

En 2009, los autores presentan una versión mejorada de su modelo. Con el nuevo modelo, los autores logran obtener un perfil de velocidad promedio que muestra una mejor imagen del comportamiento del pistón. La *figura 3.11* muestra el perfil de velocidad promedio calculado por el modelo de 2009 para la carrera ascendente, en el que se puede apreciar la mejora que se obtiene usando datos promedio en lugar de datos puntuales.

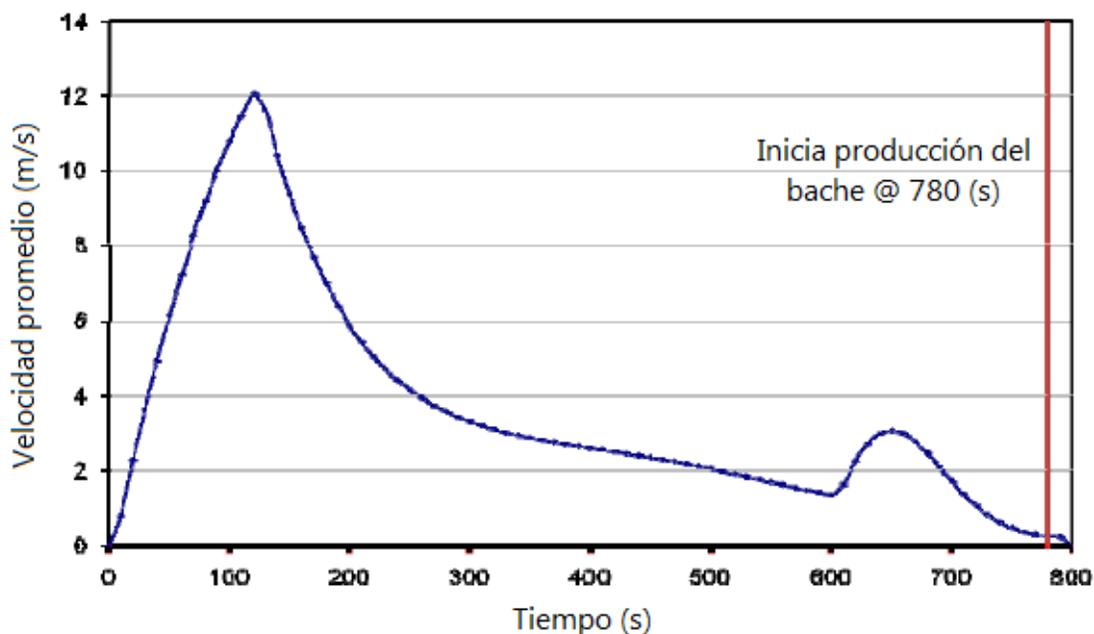


Figura 3.11 Velocidad promedio del pistón calculada por el modelo para la carrera ascendente

En esta figura se observa cómo el émbolo alcanza su velocidad máxima, 12 m/s, en el inicio de la carrera y posteriormente decrece debido a efectos gravitacionales y de fricción. Después de aproximadamente 600 segundos se da un cambio brusco producto de un disturbio y el gráfico termina a los 780 segundos, momento en el cual el bache llega a la superficie y, dado que el modelo considera que el volumen del bache es constante, pierde validez a partir del momento que comienza su producción. Puede concluirse con este modelo que la velocidad promedio durante toda la carrera ascendente es de 3.53 m/s.

La altura de la región 1 (h_4) y la región 2 (h_3) son otros resultados del modelo y como estos valores son función de la velocidad, en el modelo de 2008 son calculados intermitentemente y con algunos valores negativos. De la misma manera que el problema se soluciona utilizando valores promedio de velocidad en el modelo de 2009, el resultado para los valores de la altura de la región 1 y la región 2 mejoran en gran medida en el modelo de 2009.

El nivel del líquido en el espacio anular (h_2) también es calculado por el modelo. En esta ocasión, la única modificación que existe entre el modelo de 2008 y el de 2009 es que en el segundo, en lugar de utilizar la densidad del gas en el espacio anular, se utiliza un promedio de la densidad del gas en el fondo del espacio anular y la densidad del gas en el espacio anular en superficie. La *figura 3.12* muestra cómo el nivel del líquido en el espacio anular tiene su valor máximo de aproximadamente 25 metros al inicio de la carrera ascendente y comienza a disminuir hasta un valor aproximado de 13 metros al final de la carrera ascendente y posteriormente sigue disminuyendo hasta un valor mínimo de aproximadamente cinco metros durante el periodo de purga de gas, en donde puede observarse cómo la premisa de que el espacio anular nunca se vacía se cumple, ya que en ningún momento el nivel del líquido llega a la entrada de la TP que se encuentra a la altura de cero.

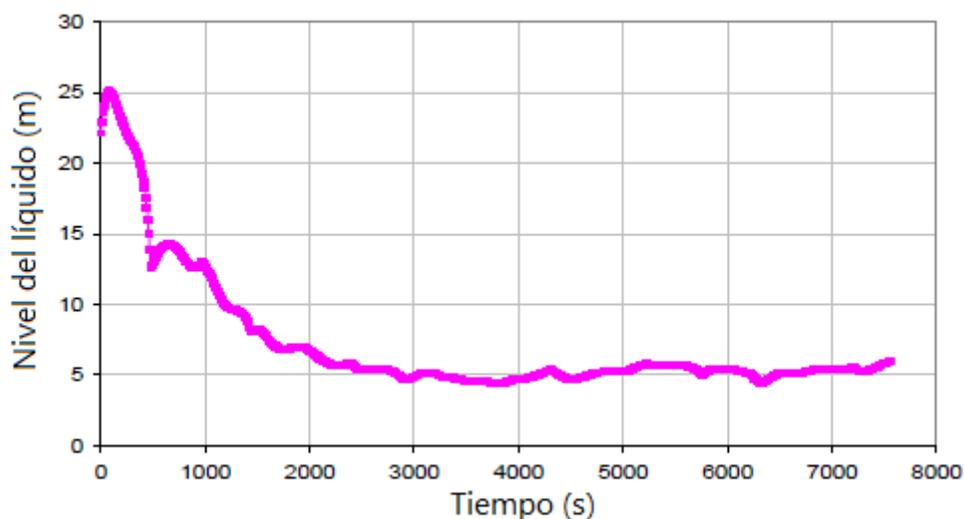


Figura 3.12 Nivel de líquido en el espacio anular calculado por el modelo

III.3 Aplicación de modelo mecanicista con datos de émbolo inteligente

Para analizar su modelo mecanicista, los autores Bello, Falcone, Xu, Scott y Harrod³ tomaron datos de dos pozos del campo Pinedale en Wyoming, EUA. El campo está localizado en la cresta de un anticlinal, con un área de 30x5 millas y tiene una profundidad del intervalo productor de entre 8,000 y 14,000 pies con yacimientos de gas del Cretácico Superior. Los pozos seleccionados para este estudio son el Warbonnet 11-4D y Warbonnet 13-4D; sin embargo, solamente se mostrará el análisis del pozo Warbonnet 13-4D (WB 13-4D).

Una característica de este modelo mecanicista es que utiliza datos medidos con el tiempo por un émbolo inteligente. Es decir, usa datos que dependen del tiempo para simular el comportamiento del pistón. Dicho modelo se alimenta con datos dinámicos, en intervalos de tiempo determinados por la frecuencia de muestreo del pistón para combinar los datos con el modelo. Para llevar a cabo lo anterior, se realizó el siguiente procedimiento.

Primero, se estudió la base de datos de dos pozos del campo Pinedale. Después, se clasificó y evaluó la información de dichos pozos correspondiente al ciclo del pistón viajero. Posteriormente, se normalizó la información relevante. Acto seguido, se modificó el modelo mecanicista para enfocarlo en pozos con empacador. Finalmente, se aplicó el modelo dinámico para evaluar el desempeño de los pozos en cuestión.

A continuación se muestra una tabla que contiene los datos utilizados en el modelo. Dicha información fue obtenida del pozo Warbonnet 13-4D.

Pozo WB 13-4D	
TP	2 3/8" (1.995")
Prof. Resorte de fondo (MD)	12 802'
Tipo de pistón	sólido
t _{fondo} (°F)	225 @ 12 802'
γ_g	0.624
° API condensado	39
RGW (bbls/MMpie ³)	40
RGC (bbls/MMpie ³)	10
IPR; P _{ini} (lb/pg ²)	10,000
P _L (lb/pg ²)	434

Tabla 3.5 Datos del pozo Warbonnet 13-4D utilizados en el modelo

No toda la información necesaria pudo ser recabada, debido a que no se tenía en la base de datos; es por eso que algunos datos debieron ser estimados. Tal es el caso de la densidad de los líquidos producidos (ρ_w) —en este caso del agua, asumiendo que es el único líquido producido—, la altura del pistón (h_p), el peso del pistón (W_p), el líquido producido por el yacimiento (x), los parámetros de la ecuación de contrapresión (n y C) y la presión del yacimiento (P_r). Dichos parámetros se muestran a continuación en la *tabla 3.6*.

Otras características deben asumirse para poder implementar el modelo. Por ejemplo, es importante señalar que el pozo WB 13-4D contaba con varias zonas

productoras; sin embargo, para solucionar el problema se agruparon en una sola zona productora equivalente; además, las zonas productoras habían sido estimuladas, por lo que no era correcto aplicar la ecuación de contrapresión. No obstante la falta de datos, se asumió un yacimiento homogéneo e isotrópico para calcular los valores de C y n .

Pozo WB 13-4D	
ρ_w (lb/pie ³)	62.4
h_p (pie)	1.522
W_p (lbr)	2
x (lb/pie ³)	64.2
n	0.85
C (Mpie ³ /d/(lb/pg ²) ²)	0.005
P_r (lb/pg ²)	4 000

Tabla 3.6 Datos estimados para el pozo Warbonnet 13-4D

En cuanto a los datos del sistema de pistón viajero inteligente, se recabaron datos de presiones superficiales en TP y TR con una frecuencia de 1 minuto. Por otra parte, la frecuencia de toma de datos de presión y temperatura (P y T) del émbolo fue de 1 segundo y la presión y temperatura de fondo también se tomaron con la misma frecuencia. A continuación, la *figura 3.13* muestra un gráfico con los datos de fondo y los datos tomados por el pistón en el pozo Warbonnet 13-4D.

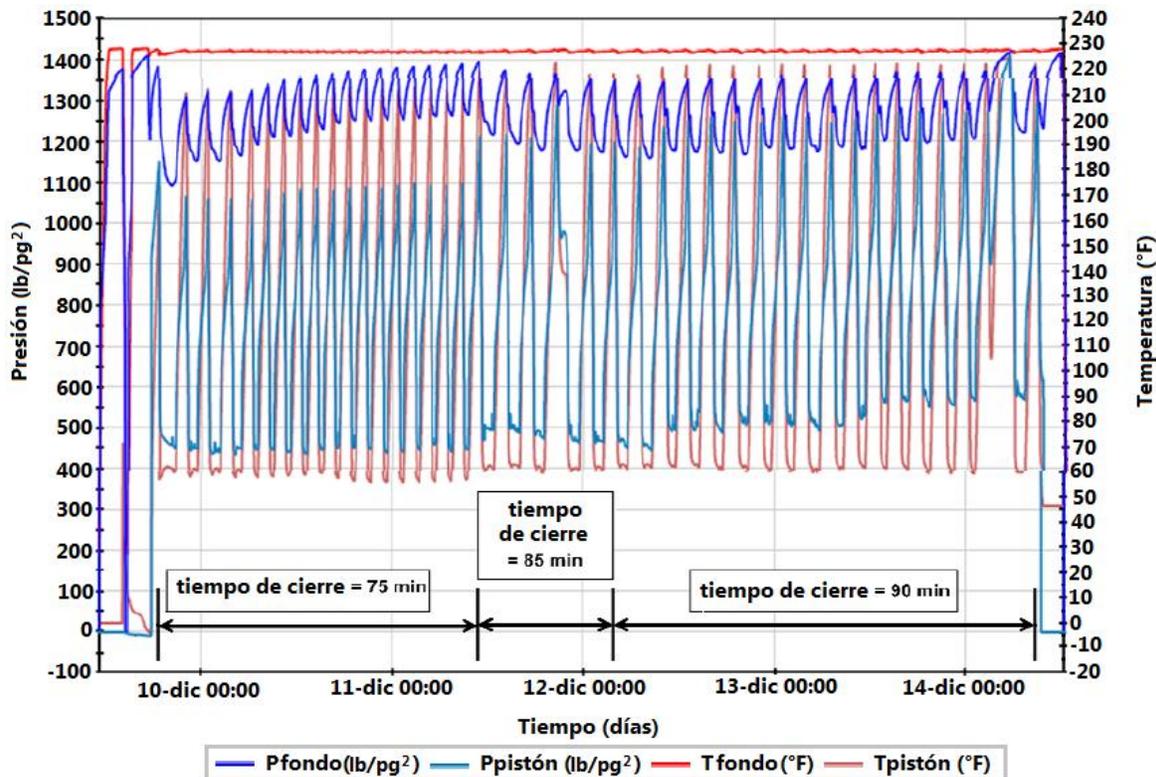


Figura 3.13 Datos de campo para tres periodos de cierre distintos

Antes de la prueba, el pozo operaba con 9.5 ciclos al día y después de la prueba el número de ciclos aumentó a 11 diarios, con periodos de cierre de la misma duración. Sin embargo, un incremento en la presión del espacio anular y un tiempo de carrera demasiado corto levantó la sospecha de que el pistón no estaba realizando la carrera descendente completa y se tomó la decisión de incrementar la duración del periodo de cierre a 85 y posteriormente a 90 minutos.

La *figura 3.14* muestra ciclos con un periodo de cierre de 90 minutos, que comienzan con el periodo de cierre, seguidos de la carrera ascendente y finalmente el periodo de purga de gas y la carrera descendente. En un gráfico como éste puede realizarse un diagnóstico primario del ciclo al analizar algunos parámetros clave que se comportan de manera similar en todos los ciclos. Dichos parámetros son fáciles de obtener dado que son datos de campo como presión de fondo, presiones superficiales en la TP y la TR, datos medidos por el pistón inteligente y producción de gas en superficie.

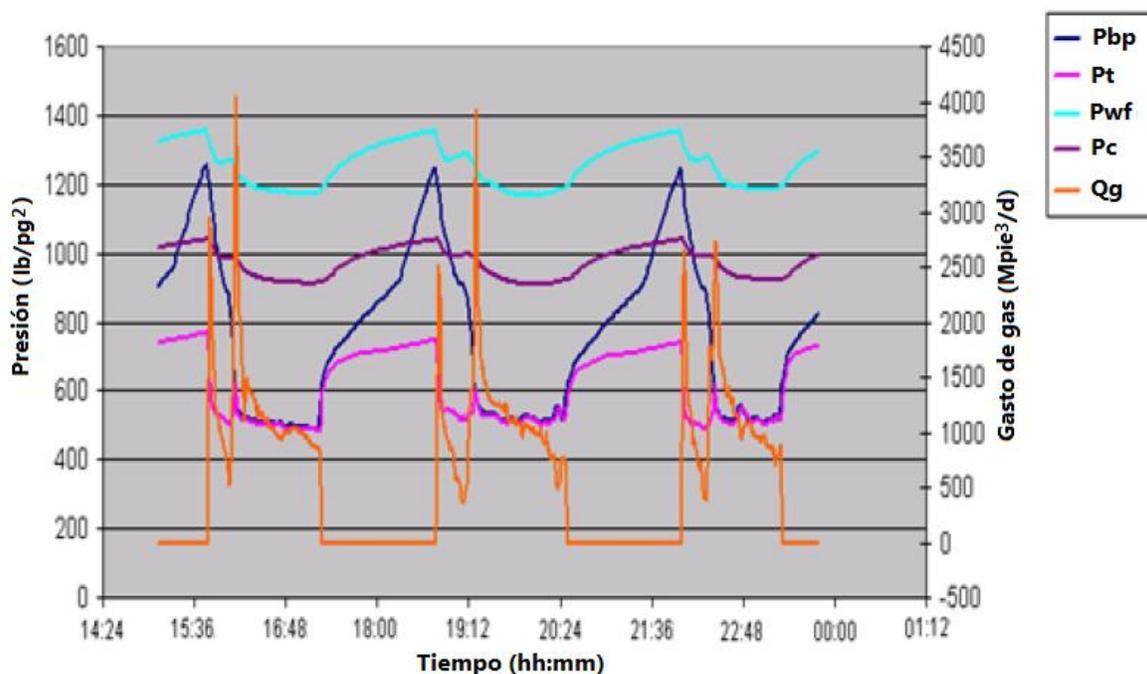


Figura 3.14 Datos de campo para un periodo de cierre de 90 minutos

Un ejemplo de lo anterior es el tiempo de duración del periodo de purga de gas. Para analizarlo, se compara la presión medida por el pistón y la presión en cabeza de la TP. Estas dos presiones tienden a igualarse cuando el émbolo es almacenado en el lubricador y permanecen con un valor muy similar durante el periodo de purga de gas.

Otro ejemplo es el inicio de producción del bache. Para identificarlo, se localiza un pico en la presión superficial de la TP que se forma antes de que el pistón llegue al lubricador.

Entre otros eventos que podemos observar en estos gráficos están: si la tubería tiene alguna obstrucción, el momento en el que el pistón llega al líquido durante la carrera descendente, el momento en que llega al resorte de fondo e incluso, si se diera el caso, si el émbolo no realiza completamente alguna de las carreras.

En la *figura 3.15* se analiza un ciclo para el pozo WB 13-4D y se puede identificar el periodo de cierre que comienza con el incremento súbito en la presión medida por el pistón (P_{bp}). El periodo de cierre inicia con el lapso de tiempo en que el pistón cae a través del gas a una velocidad de 59.4 m/min durante aproximadamente 61 minutos hasta que entra en el líquido y la tendencia de la línea de presión cambia por un lapso de tiempo de 29 minutos en los que continua la carrera descendente a través del líquido a una velocidad de 10.6 m/min. Durante su viaje a través del líquido, se presenta una perturbación manifestando una obstrucción que puede atribuirse a basura o a alguna incrustación.

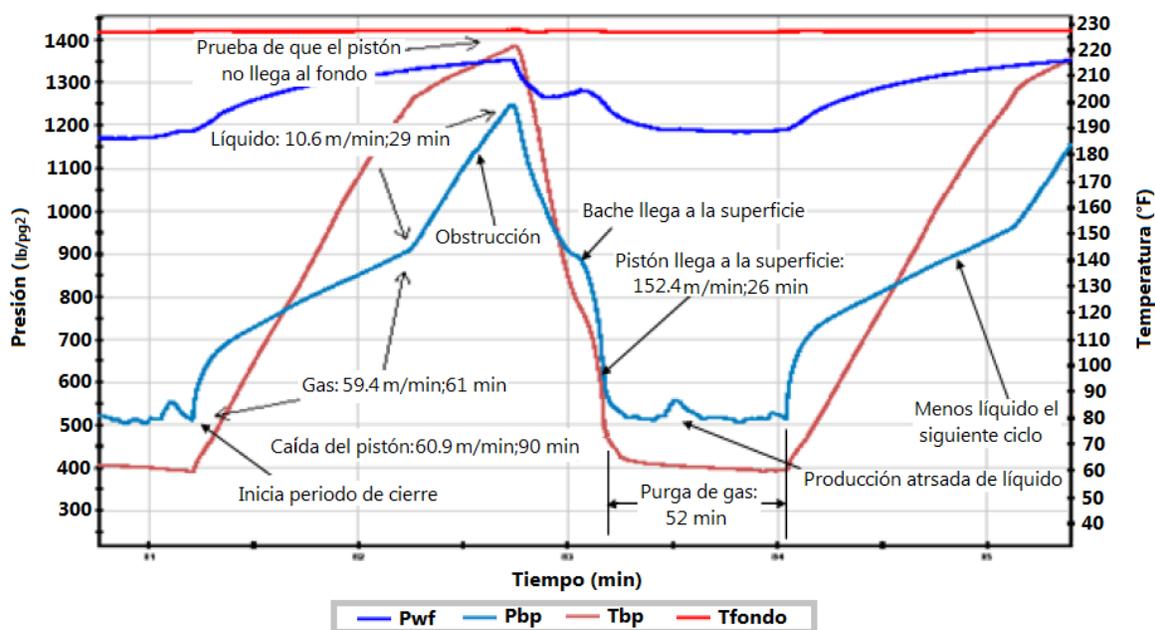


Figura 3.15 Análisis del ciclo con periodo de cierre de 90 minutos

Tras los 90 minutos del periodo de cierre, viene el periodo de apertura en el que la presión medida por el émbolo (P_{bp}) cae repentinamente, hasta identificar la llegada del líquido a la superficie; posteriormente viene la producción del bache que culmina con la llegada del émbolo al lubricador. Finalmente, se tiene el

periodo de purga de gas con un pico en la presión superficial que indica una producción posterior de líquido arrastrado por el gas. El ciclo finaliza cuando la presión incrementa de nuevo, dando lugar al próximo ciclo.

El análisis de la *figura 3.15* muestra una diferencia de aproximadamente 100 lb/pg² en la presión máxima leída por el émbolo y la presión en el fondo, lo que sugiere que el émbolo no llega al resorte en el fondo del pozo. Esto puede corroborarse con las lecturas de temperatura en las cuales se evidencia que tampoco se igualan en ningún momento la temperatura leída por el pistón inteligente y la temperatura de fondo.

Además, puede calcularse una velocidad promedio para la carrera descendente de aproximadamente 42.67 m/min.

Tras analizar los datos, se identificaron dos patrones distintos; el primero, en el cual es evidente que el ciclo no es el ideal debido a un periodo de cierre demasiado corto en el que el pistón no llega al fondo durante la carrera descendente, y el segundo, en el que se exhibe la gama completa de cambios esperados en los gradientes, típica de un émbolo que realiza completa la carrera descendente.

En esta ocasión, la investigación continuó seleccionando el segundo patrón, en el que el pistón atraviesa el gas, entra en el líquido y llega hasta el resorte de fondo completando la carrera descendente.

La *figura 3.16* muestra el resultado obtenido tras aplicar el modelo mecanicista para calcular la velocidad de la carrera ascendente en función del tiempo. En esta figura puede observarse que la máxima velocidad del émbolo es de 6.33 m/s y se tiene al principio de la carrera ascendente; posteriormente disminuye debido a la fricción y las fuerzas gravitatorias obteniendo una velocidad promedio de 3.26 m/s. Aun así, el émbolo llega a la superficie con una velocidad de 2 m/s que sigue siendo ligeramente elevada y sugiere que probablemente el periodo de cierre provee una acumulación de energía mayor a la mínima requerida para llevar el pistón hasta la superficie, comportamiento que se presenta en periodos de cierre demasiado largos.

Así, la implementación del modelo resalta un nuevo problema del ciclo: un periodo de cierre demasiado largo. Un análisis de sensibilidad demostró que la variable que más afecta la velocidad ascendente del pistón es la densidad específica del gas. Sin embargo, la velocidad del gas también tiende a incrementar conforme aumenta el gasto de producción de gas.

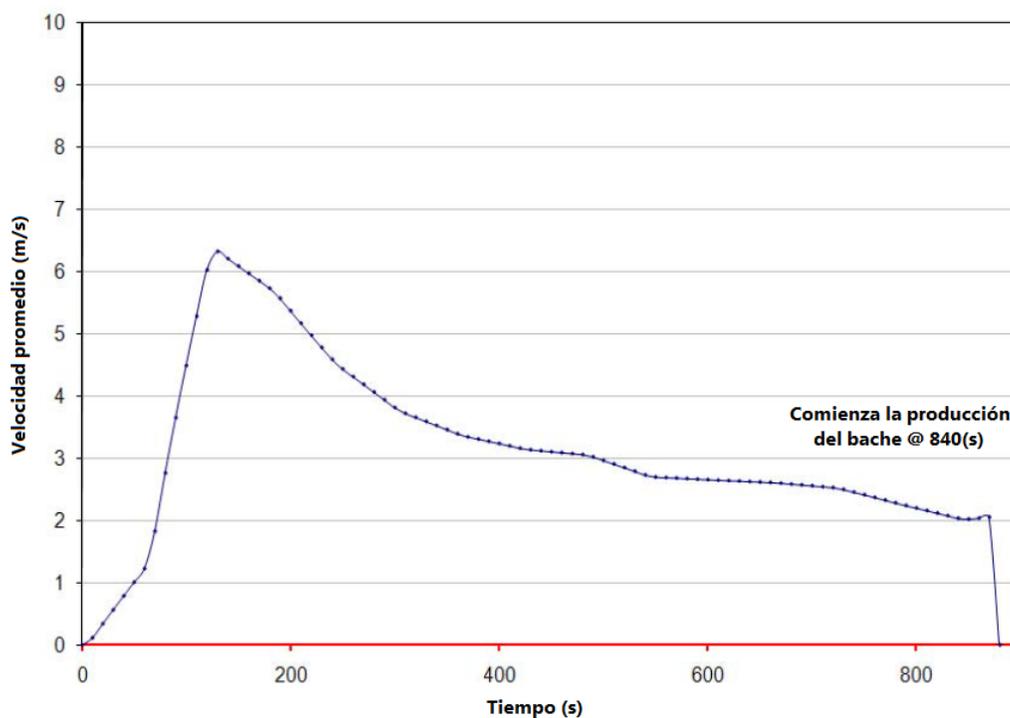


Figura 3.16 Velocidad promedio del pistón durante la carrera ascendente

De tal manera, los demás parámetros estimados, obtenidos tras la aplicación del modelo mecanicista, se muestran en la *tabla 3.7*.

Parámetros estimados	
Altura del bache (m)	93.48
Volumen del bache (bls)	1.599
Tiempo de la carrera descendente (min)	65
Tiempo para que el pistón llegue al lubricador (min)	20
Tiempo para que empiece la producción del bache (min)	14
Tiempo de producción del bache (min)	6
Tiempo de purga de gas (min)	52

Tabla 3.7 Parámetros calculados

III.4 Aplicación del modelo analítico para el método combinado Pistón Viajero-BNI utilizando tubería flexible

Para la aplicación del presente modelo, Bello, Falcone, Xu y Scott⁴ desarrollaron una metodología que permite monitorear y evaluar el funcionamiento del pistón en un amplio rango de escenarios de operación. La metodología se muestra en el diagrama de flujo de la *figura 3.17* y consta de los siguientes doce pasos:

1. Obtención de datos: geometría del pozo, parámetros operacionales y datos del sistema.
2. Obtener los valores iniciales de las presiones estáticas.
3. Asumir un valor inicial para la altura del líquido (h_L).
4. Calcular la presión estática de fondo en la TF ($P_{ws,TF}$) y la presión estática de fondo en el espacio anular TP-TF ($P_{ws,ea}$).
5. Calcular la variación de la presión (ΔP) y el cambio en el volumen (ΔV) a alta presión y a baja presión de las *ecuaciones 2.114* y *2.115*.
6. Calcular el valor del cambio de altura del agua desplazada al interior de la tubería flexible (Δh_{ea}) y el cambio en la altura del líquido en la TF (Δh_{TF}).
7. Estimar el cambio en el volumen de agua ($\Delta V_{w,TF}$) y el cambio en el volumen de gas en la tubería flexible ($\Delta V_{g,TF}$).
8. Calcular la fracción de volumen de gas (H_g) y la densidad de la mezcla (ρ_m).
9. Verificar si la válvula de pie permanece abierta o cerrada ($\dot{\Delta}P_{val} < \Delta P_{min}?$).
10. Calcular la producción por ciclo, el tiempo de duración del ciclo y la producción diaria.
11. Repetir los pasos 3 al 10 hasta que la presión en el fondo del espacio con forma de U (P_{wfi}) sea igual a la presión en la cabeza (P_{wh}), *ecuación 2.124*.
12. Mostrar los resultados obtenidos.



Figura 3.17 Diagrama de flujo para monitorear y evaluar el modelo

Para demostrar la factibilidad de utilizar el método de Pistón Viajero dentro de una tubería flexible fueron utilizados los siguientes datos del pozo, de la TP y de la TF que se presentan en la *tabla 3.8*, como datos de entrada, junto con parámetros operativos y características del sistema.

Variable	Simbología	Unidades de campo	SI
Longitud de la TP	hTP	13,200 (pies)	4,023.4 (m)
Longitud de la TF	hTF	13,000 (pies)	3,962.4 (m)
Altura del líquido en la TF	hL,TF	200 - 400 (pies)	60.96 - 121.9 (m)
Densidad del agua	ρ_w	62.4 (lb/pie ³)	1,000 (kg/m ³)
Diámetro interno de la TF	dTF	1.374 (pg)	0.035 (m)
Diámetro externo de la TF	DTF	1.75 (pg)	0.044 (m)
Diámetro interno de la TP	dTP	1.995 (pg)	0.051 (m)
Diámetro externo de la TP	DTP	2.375 (pg)	0.060 (m)
Diámetro interno de la TR	dTR	3.92 (pg)	0.099(m)
Densidad específica del gas	γ_g	0.623	0.623
Densidad específica del líquido	γ_L	1.02	1.02
Presión de la línea de descarga	PL	550 (lb/pg ²)	3,792.116 (kPa)
Presión en la TR	PTR	550 (lb/pg ²)	3,792.116 (kPa)
Presión en el fondo de la forma de U	P _{wf,bU}	600 (lb/pg ²)	4,136.854 (kPa)
Temperatura en la cabeza	T _{wh}	90 (°F)	305.372 (K)
Temperatura en el fondo	T _{wf}	225 (°F)	380.372 (K)
Relación gas-agua	RGW	40 (bll/MMpie ³)	0.23 (m ³ /E ³ m ³)
Velocidad descendente del pistón en gas	V _{PFg}	200 (pie/min)	1.016 (m/s)
Velocidad descendente del pistón en líquido	V _{PF_L}	194 (pie/min)	0.986 (m/s)
Rugosidad efectiva de la tubería	k	0.0018 (pies)	0.000548 (m)
Gasto de inyección de gas	q _{g,iny}	130 (Mpie ³ /d)	0.043 (m ³ /s)
Presión de inyección de gas	P _{g,iny}	800 (lb/pg ²)	5,515.805 (kPa)
Tensión superficial	σ	72 (dinas/cm)	0.072 (N/m)
Diámetro del pistón	dP	1.25 (pg)	0.032 (m)
Altura del pistón	hP	17.755 (pg)	0.451 (m)
Peso del pistón	WP	5 (lbr)	22.24 (N)

Tabla 3.8 Datos de entrada para el modelo

Para este caso, un estudio previo e independiente sobre los pistones inteligentes indicó que un lapso de 50 minutos era apropiado para el tiempo del periodo de purga de gas. Además, se analiza el modelo con distintos valores para las variables de: valor inicial de la altura del bache, presión de inyección del gas y gasto del gas de inyección como se muestra en la *tabla 3.9*.

Aplicando el modelo se obtienen las presiones de fondo estáticas en el espacio anular y en el interior de la tubería flexible, antes y después de la expansión del fluido, mostradas en las *figuras 3.18* y *3.19*. Con dichas presiones puede calcularse la capacidad de levantamiento de líquido por cada ciclo, el levantamiento de líquido por día, la velocidad del émbolo durante la carrera

ascendente y los distintos tiempos que sumados darán como resultado el tiempo total de duración del ciclo.

Variables iniciales	
Altura del bache	(pie)
1	200
2	400
3	600
Presión de inyección del gas	(lb/pg ²)
1	800
2	1100
3	1400
Gasto de inyección de gas	(Mpie ³ /d)
1	300
2	500
3	700

Tabla 3.9 Variables de entrada para el modelo

Al analizar la *figura 3.19*, se puede apreciar que el bache de 200 pies puede ser levantado con cualquiera de las presiones de inyección de gas, pero no así los baches de 400 y 600 pies ya que estos últimos no pueden ser levantados si se inyecta el gas a 800 lb/pg² debido a que, tras la expansión del gas de inyección, la presión estática de fondo calculada al interior de la tubería flexible que generan la columna de gas y la columna de líquido formada por el bache y todo el líquido que se encontraba en el espacio anular, resulta ser mayor que la presión estática de fondo en el espacio anular TP-TF, impidiendo así la producción. Es decir, cualquier bache mayor a 300 pies necesita, forzosamente, una presión de inyección de gas mayor, de manera que al presentar el gráfico, las líneas no intersecan, evidenciando así que la presión que se desea vencer sea menor a la presión acumulada por el gas.

Más adelante, en la *tabla 3.10*, se muestran los resultados del modelo con todos los escenarios posibles, es decir, aplicando los tres valores de las tres variables. Y puede observarse que el gasto de inyección más alto (700 Mpie³/d) está relacionado con el mayor volumen de líquido levantado por día. Entonces, se puede decir que al incrementar el gasto de inyección aumenta el líquido producido. Esto se debe a que al inyectar a un mayor gasto el gas, disminuye el tiempo de inyección y esto se refleja en un mayor número de ciclos diarios.

Asimismo, al aumentar la presión de inyección, aumenta también el rendimiento en el levantamiento del líquido. De manera que al variar las

condiciones de 800 lb/pg² y 300 Mpie³/d a 1,400 lb/pg² y 700 Mpie³/d para un bache de 600 pies, el líquido producido pasa de cero a 11.18 bpd.

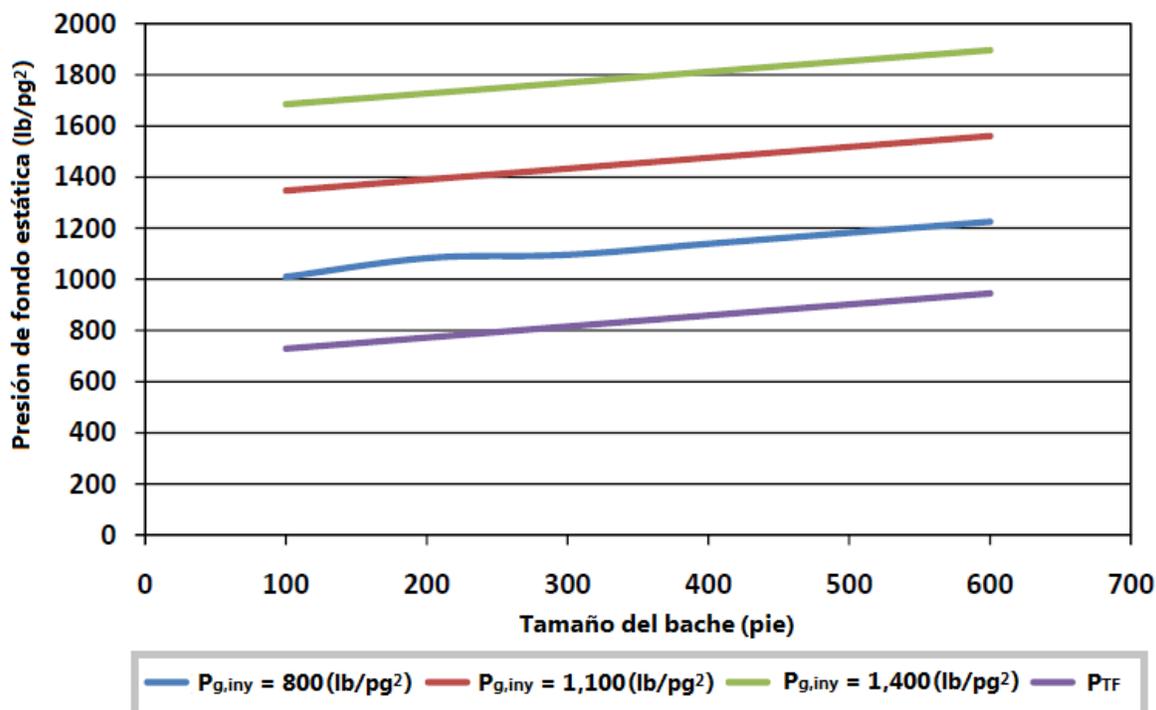


Figura 3.18 Presiones de fondo vs altura del bache antes de la expansión

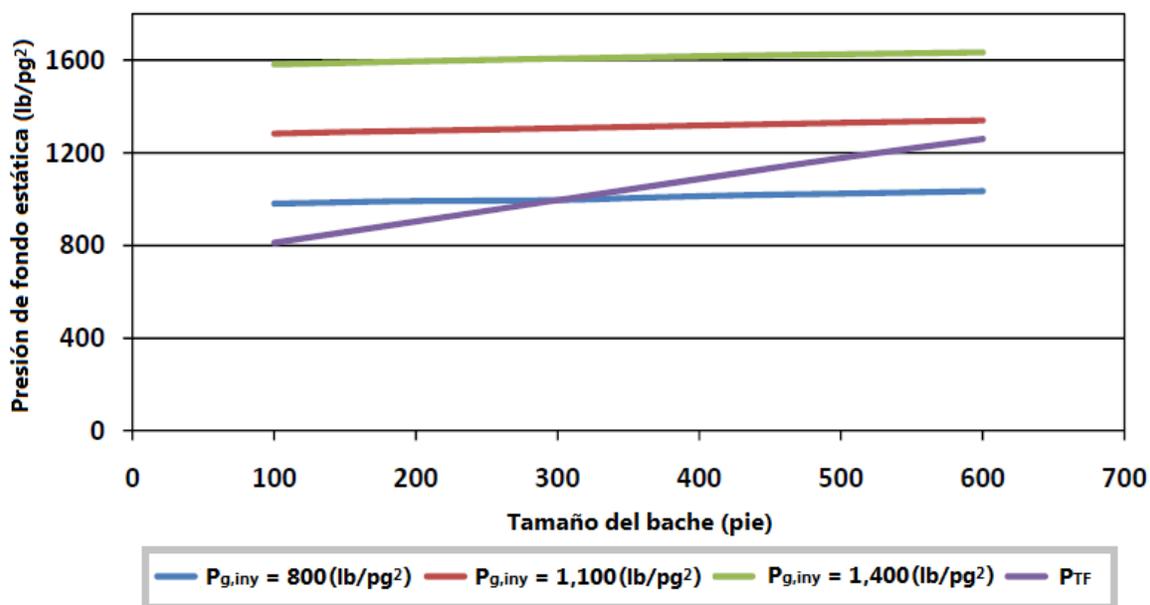


Figura 3.19 Presiones de fondo vs altura del bache después de la expansión

Altura inicial del bache (pie)	Presión de inyección (lb/pg ²)	Gasto de inyección (Mpie ³ /d)	Líquido levantado por ciclo (blis)	Ciclos por día (-)	Líquido levantado por día (bpd)	Velocidad de la carrera ascendente (pie/min)	Tiempo de la carrera ascendente (min)	Tiempo de la carrera descendente (min)	Tiempo de inyección de gas (min)	Tiempo de purga de gas (min)	Tiempo total del ciclo (min)
200	800	300	0.40	9.76	3.943	924	14.1	71.5	11.9	50.0	147.5
		500	0.40	10.10	4.075	924	14.1	71.5	7.2	50.0	142.7
		700	0.40	10.20	4.135	924	14.1	71.5	5.1	50.0	140.6
	1100	300	0.43	9.67	4.161	1,022	12.7	71.5	14.6	50.0	148.8
		500	0.43	10.10	4.333	1,022	12.7	71.5	8.7	50.0	142.9
		700	0.43	10.20	4.407	1,022	12.7	71.5	6.3	50.0	140.5
	1400	300	0.45	9.57	4.308	1,113	11.6	71.5	17.3	50.0	150.4
		500	0.45	10.00	4.515	1,113	11.6	71.5	10.4	50.0	143.5
		700	0.45	10.20	4.612	1,113	11.6	71.5	7.4	50.0	140.5
400	800	300	0.00	0.00	0.000	0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0
		500	0.00	0.00	0.000	0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0
		700	0.00	0.00	0.000	0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0
	1100	300	0.78	9.35	7.293	717	18.1	71.5	14.4	50.00	154.0
		500	0.78	9.72	7.578	717	18.1	71.5	8.6	50.00	148.2
		700	0.78	9.88	7.703	717	18.1	71.5	6.2	50.00	145.8
	1400	300	0.80	9.27	7.422	781	16.7	71.5	17.0	50.00	155.2
		500	0.80	9.70	7.762	781	16.7	71.5	10.2	50.00	148.4
		700	0.80	9.90	7.917	781	16.7	71.5	7.3	50.00	145.5
600	800	300	0.00	0.00	0.000	0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0
		500	0.00	0.00	0.000	0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0
		700	0.00	0.00	0.000	0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0
	1100	300	1.15	9.11	10.470	581	22.4	71.5	14.2	50.00	158.1
		500	1.15	9.45	10.860	581	22.4	71.5	8.5	50.00	152.4
		700	1.15	9.60	11.040	581	22.4	71.5	6.1	50.00	150.0
	1400	300	1.16	9.06	10.510	632	20.6	71.5	16.8	50.00	158.9
		500	1.16	9.46	10.970	632	20.6	71.5	10.1	50.00	152.2
		700	1.16	9.65	11.180	632	20.6	71.5	7.2	50.00	149.3

Tabla 3.10 Resultados del modelo

Otro parámetro resultado del modelo es la velocidad de la carrera ascendente. En la *figura 3.20* es posible analizar el efecto combinado de la altura del bache y la presión de inyección en la velocidad de la carrera ascendente. Como puede observarse, la velocidad del émbolo presenta una relación inversamente proporcional a la altura del bache, ya que disminuye conforme la altura del bache aumenta. Esto es debido a que el incremento en la altura del bache aumenta la contrapresión que genera la columna hidrostática y la carga que se tiene que vencer es mayor.

El efecto de la presión de inyección del gas tiene una relación directamente proporcional a la velocidad de la carrera ascendente; sin embargo, no de manera significativa. Como puede observarse en la *figura 3.20*, la velocidad del pistón incrementa conforme aumenta la presión del gas de inyección. Además, el efecto de incrementar la presión de inyección también se ve afectado por el tamaño del bache, ya que al aumentar la presión de inyección de 950 lb/pg^2 a 1100 lb/pg^2 , un bache de 100 pies de altura aumentaría su velocidad en 150 pie/min, mientras uno de 200 pies lo haría en 100 pie/min y uno de 600 pies lo haría tan solo en 50 pie/min.

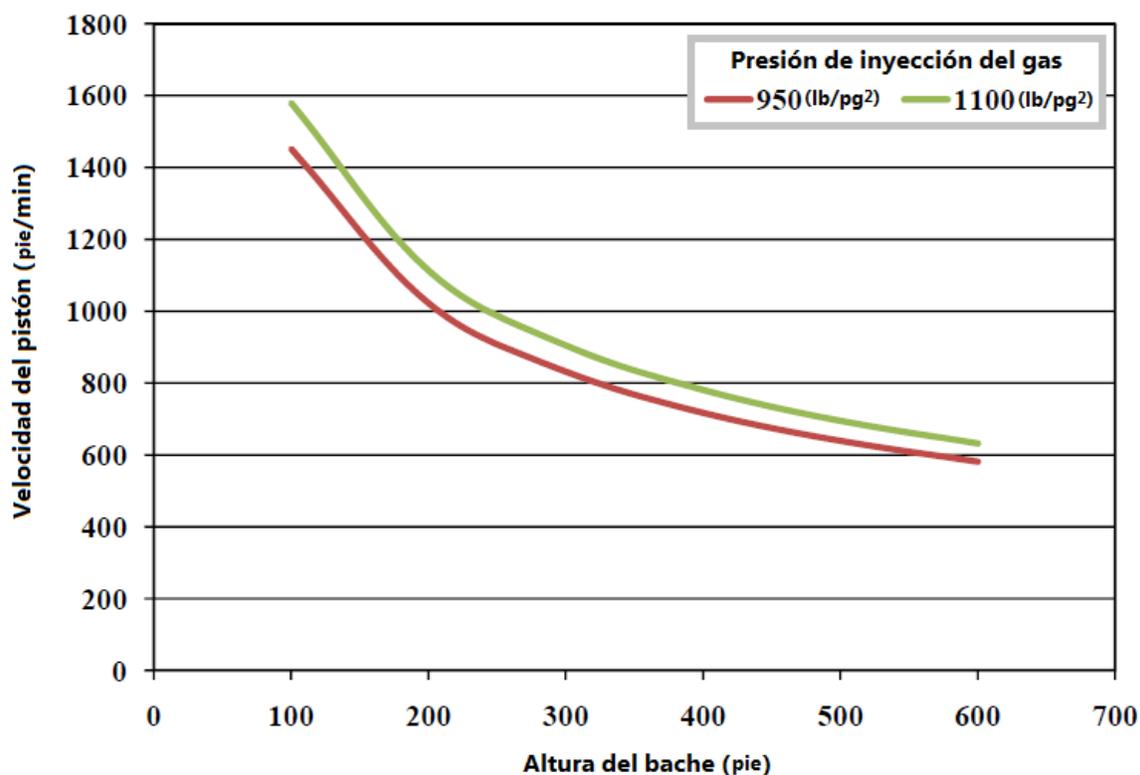


Figura 3.20 Efecto combinado de la presión de inyección y la altura del bache en la velocidad del pistón

Lista de figuras

Figura 3.1 Producción de gas correspondiente a la presión en la TP. TANG, Y. y LIANG, Z. *A New Method of Plunger Lift Dynamic Analysis and Optimal Design for Gas Well Deliquification*. SPE 116764, 2008.

Figura 3.2 Escenario 1 de optimización.

Figura 3.3 Escenario 2 de optimización. TANG, Y. y LIANG, Z. *A New Method of Plunger Lift Dynamic Analysis and Optimal Design for Gas Well Deliquification*. SPE 116764, 2008.

Figura 3.4 Escenario 3 de optimización. TANG, Y. y LIANG, Z. *A New Method of Plunger Lift Dynamic Analysis and Optimal Design for Gas Well Deliquification*. SPE 116764, 2008.

Figura 3.5 Escenario 4 de optimización. TANG, Y. y LIANG, Z. *A New Method of Plunger Lift Dynamic Analysis and Optimal Design for Gas Well Deliquification*. SPE 116764, 2008.

Figura 3.6 Resultados del modelo para la carrera ascendente utilizando el primer escenario. TANG, Y. y LIANG, Z. *A New Method of Plunger Lift Dynamic Analysis and Optimal Design for Gas Well Deliquification*. SPE 116764, 2008.

Figura 3.7 Resultados del modelo para la carrera descendente utilizando el primer escenario. TANG, Y. y LIANG, Z. *A New Method of Plunger Lift Dynamic Analysis and Optimal Design for Gas Well Deliquification*. SPE 116764, 2008.

Figura 3.8 Datos de campo disponibles para el modelo. CHAVA, G. K.; FALCONE, G. y TEODORIU, C. *Development of a New Plunger-Lift Model Using Smart Plunger Data*. SPE 115934, 2008.

Figura 3.9 Datos de campo disponibles del periodo de apertura para un solo ciclo. CHAVA, G. K.; FALCONE, G. y TEODORIU, C. *Development of a New Plunger-Lift Model Using Smart Plunger Data*. SPE 115934, 2008.

Figura 3.10 Perfil de velocidades del pistón calculado por el modelo para la carrera ascendente. CHAVA, G. K.; FALCONE, G. y TEODORIU, C. *Development of a New Plunger-Lift Model Using Smart Plunger Data*. SPE 115934, 2008.

Figura 3.11 Velocidad promedio del pistón calculada por el modelo para la carrera ascendente. CHAVA, G. K.; FALCONE, G. y TEODORIU, C. *Plunger Lift Modeling Towards Efficient Liquid Unloading in Gas Wells*. SPE 124515, 2009.

Figura 3.12 Nivel de líquido en el espacio anular calculado por el modelo. CHAVA, G. K.; FALCONE, G. y TEODORIU, C. *Development of a New Plunger-Lift Model Using Smart Plunger Data*. SPE 115934, 2008.

Figura 3.13 Datos de campo para tres periodos de cierre distintos. BELLO, O.; FALCONE, G.; XU, J.; SCOTT, S. y HARROD, J. *Evaluation of Liquid Loading in the Pinedale Field: Integration of Smart Plunger Data and Mechanistic Modeling*. SPE 141250, 2011.

Figura 3.14 Datos de campo para un periodo de cierre de 90 minutos BELLO, O.; FALCONE, G.; XU, J.; SCOTT, S. y HARROD, J. *Evaluation of Liquid Loading in the Pinedale Field: Integration of Smart Plunger Data and Mechanistic Modeling*. SPE 141250, 2011.

Figura 3.15 Análisis del ciclo con periodo de cierre de 90 minutos. BELLO, O.; FALCONE, G.; XU, J.; SCOTT, S. y HARROD, J. *Evaluation of Liquid Loading in the Pinedale Field: Integration of Smart Plunger Data and Mechanistic Modeling*. SPE 141250, 2011.

Figura 3.16 Velocidad promedio del pistón durante la carrera ascendente. BELLO, O.; FALCONE, G.; XU, J.; SCOTT, S. y HARROD, J. *Evaluation of Liquid Loading in the Pinedale Field: Integration of Smart Plunger Data and Mechanistic Modeling*. SPE 141250, 2011.

Figura 3.17 Diagrama de flujo para monitorear y evaluar el modelo. BELLO, O.; FALCONE, G.; XU, J. y SCOTT, S. *Performance Evaluation of a Plunger Assisted Intermittent Gas Lift System*. SPE 141251, 2011.

Figura 3.18 Presiones de fondo vs altura del bache antes de la expansión. BELLO, O.; FALCONE, G.; XU, J. y SCOTT, S. *Performance Evaluation of a Plunger Assisted Intermittent Gas Lift System*. SPE 141251, 2011.

Figura 3.19 Presiones de fondo vs altura del bache después de la expansión. BELLO, O.; FALCONE, G.; XU, J. y SCOTT, S. *Performance Evaluation of a Plunger Assisted Intermittent Gas Lift System*. SPE 141251, 2011.

Figura 3.20 Efecto combinado de la presión de inyección y la altura del bache en la velocidad del pistón. BELLO, O.; FALCONE, G.; XU, J. y SCOTT, S. *Performance Evaluation of a Plunger Assisted Intermittent Gas Lift System*. SPE 141251, 2011.

Lista de tablas

Tabla 3.1 Datos introducidos al modelo. TANG, Y. y LIANG, Z. *A New Method of Plunger Lift Dynamic Analysis and Optimal Design for Gas Well Deliquification*. SPE 116764, 2008.

Tabla 3.2 Resultados del modelo para el escenario 1. TANG, Y. y LIANG, Z. *A New Method of Plunger Lift Dynamic Analysis and Optimal Design for Gas Well Deliquification*. SPE 116764, 2008.

Tabla 3.3 Resultados del modelo para el escenario 2. TANG, Y. y LIANG, Z. *A New Method of Plunger Lift Dynamic Analysis and Optimal Design for Gas Well Deliquification*. SPE 116764, 2008.

Tabla 3.4 Resultados del modelo para el escenario 3. TANG, Y. y LIANG, Z. *A New Method of Plunger Lift Dynamic Analysis and Optimal Design for Gas Well Deliquification*. SPE 116764, 2008.

Tabla 3.5 Datos del pozo Warbonnet 13-4D utilizados en el modelo. BELLO, O.; FALCONE, G.; XU, J.; SCOTT, S. y HARROD, J. *Evaluation of Liquid Loading in the Pinedale Field: Integration of Smart Plunger Data and Mechanistic Modeling*. SPE 141250, 2011.

Tabla 3.6 Datos estimados para el pozo Warbonnet 13-4D. BELLO, O.; FALCONE, G.; XU, J.; SCOTT, S. y HARROD, J. *Evaluation of Liquid Loading in the Pinedale Field: Integration of Smart Plunger Data and Mechanistic Modeling*. SPE 141250, 2011.

Tabla 3.7 Parámetros calculados. BELLO, O.; FALCONE, G.; XU, J.; SCOTT, S. y HARROD, J. *Evaluation of Liquid Loading in the Pinedale Field: Integration of Smart Plunger Data and Mechanistic Modeling*. SPE 141250, 2011.

Tabla 3.8 Datos de entrada para el modelo. BELLO, O.; FALCONE, G.; XU, J. y SCOTT, S. *Performance Evaluation of a Plunger Assisted Intermittent Gas Lift System*. SPE 141251, 2011.

Tabla 3.9 Variables de entrada para el modelo.

Tabla 3.10 Resultados del modelo. BELLO, O.; FALCONE, G.; XU, J. y SCOTT, S. *Performance Evaluation of a Plunger Assisted Intermittent Gas Lift System*. SPE 141251, 2011.

Referencias

1. TANG, Y. y LIANG, Z. *A New Method of Plunger Lift Dynamic Analysis and Optimal Design for Gas Well Deliquification*. SPE 116764, 2008.
2. CHAVA, G. K.; FALCONE, G. y TEODORIU, C. *Development of a New Plunger-Lift Model Using Smart Plunger Data*. SPE 115934, 2008.
3. BELLO, O.; FALCONE, G.; XU, J.; SCOTT, S. y HARROD, J. *Evaluation of Liquid Loading in the Pinedale Field: Integration of Smart Plunger Data and Mechanistic Modeling*. SPE 141250, 2011.
4. BELLO, O.; FALCONE, G.; XU, J. y SCOTT, S. *Performance Evaluation of a Plunger Assisted Intermittent Gas Lift System*. SPE 141251, 2011.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS NUEVOS MODELOS



Después de su aplicación, los nuevos modelos matemáticos que pretenden describir el funcionamiento y el desempeño del pistón viajero deben evaluar sus resultados para comprobar su confiabilidad. Así, este capítulo presenta un análisis y una discusión de los resultados obtenidos en los ejemplos de aplicación mostrados en el capítulo anterior, con el fin de mostrar la medida en que estos nuevos modelos servirán para optimizar o predecir el funcionamiento del método del pistón viajero. De manera que, a lo largo de este capítulo, se analizará si los modelos son capaces de proveer una predicción y una descripción certera del método del pistón viajero.

IV.1 Análisis del modelo dinámico

Al aplicar el modelo dinámico propuesto por Tang y Liang¹, debe tenerse presente el objetivo de la aplicación del método. En este caso, el objetivo fundamental del pistón viajero fue maximizar la producción de gas en el pozo estudiado.

Para alcanzar el objetivo, primero se tomó información del pozo productor de gas del campo Sichuan en China que comenzaba a presentar problemas de carga de líquido, por lo que se implementó el método del pistón viajero. Para aplicar el método, se realizaron pruebas de cierre y de apertura. Para conocer las limitaciones del pozo, se obtuvieron las presiones máximas y mínimas, así como los tiempos correspondientes para alcanzar dichas presiones y se comenzó a operar bajo dichas condiciones. Los datos de campo obtenidos para probar la eficiencia del modelo son los mostrados a continuación en la *tabla 4.1*.

Datos de campo			
tc (s)	3300	top (s)	1380
P _{c,max} (MPa)	7.3	P _{t,max} (MPa)	2.7
P _{c,min} (MPa)	6.8	P _{t,min} (MPa)	1.2
Q _g (m ³ /d)	14640	Q _l (m ³ /d)	17.1

Tabla 4.1 Datos de campo

Donde

P_{c,max}: presión máxima en la tubería de revestimiento

P_{c,min}: presión mínima en la tubería de revestimiento

P_{t,max}: presión máxima en la tubería de producción

$P_{t,min}$: presión mínima en la tubería de producción

Q_g : gasto de gas

Q_l : gasto de líquido

t_c : tiempo del periodo de cierre

t_{op} : tiempo del periodo de apertura

A continuación, se aplicó el modelo para las condiciones de operación existentes, obteniendo resultados favorables en los que se puede observar la efectividad del modelo, ya que para las condiciones prevalecientes, el modelo predijo un valor de producción de gas muy cercano: 14,789 m³/d cuando el pozo realmente producía 14,640 m³/d, solamente 149 m³/d por encima del valor actual, lo que equivale a sobrestimar el valor real con un error de 1.01%. Por su parte, el valor de la producción de líquido fue menos certero, sin embargo, con un error de 11.11% sobre el valor de producción real, el modelo predijo 19 m³/d de líquido cuando la producción real fue de 17.1 m³/d.

Resultados			
t_c (s)	3300	t_{op} (s)	1380
$P_{c,max}$ (MPa)	7.3	$P_{t,max}$ (MPa)	2.7
$P_{c,min}$ (MPa)	6.8	$P_{t,min}$ (MPa)	1.2
Q_g (m ³ /d)	14789	Q_l (m ³ /d)	19

Tabla 4.2 Resultados del modelo

Con el análisis anterior se demuestra que el modelo puede utilizarse con algunas reservas, pero sus resultados son confiables. Gran parte del éxito de este modelo se debe al desarrollo de ecuaciones que describen el fenómeno de acumulación de líquido de manera efectiva. El fenómeno de acumulación de líquido se realizó adoptando el enfoque propuesto por Lea² y modificándolo, especialmente en lo relativo al resbalamiento y a la transferencia de líquido del interior de la tubería de producción hacia el espacio anular.

La transferencia de líquido de la tubería de producción hacia el espacio anular es un mecanismo de acumulación de líquido que se presenta durante el periodo de cierre y que difiere de lo propuesto por James Lea², quien simplemente afirma que el nivel de líquido en la tubería de producción será mayor al nivel de líquido en el espacio anular. En el presente modelo, que involucra presiones variables en la tubería de producción (TP) y la tubería de revestimiento (TR), se demuestra que la diferencia de presiones entre la TR y la TP es mayor al inicio del periodo de cierre que al final ($[P_{c,A}-P_{t,A}] > [P_{c,C}-P_{t,C}]$). Por lo tanto, la diferencia de

alturas del líquido entre la TP y la TR al inicio del periodo de cierre será mayor que al final del periodo, lo que significa que parte del líquido que se encuentra en la TP es transferido hacia el espacio anular. Este fenómeno afecta la acumulación de líquido en la tubería de producción, disminuyendo el volumen de líquido que posteriormente formará al bache.

Otro mecanismo de acumulación de líquido es el líquido aportado por la formación. En esta ocasión se sigue el mismo enfoque de James Lea², en el que todo el líquido aportado por la formación entra simultáneamente en la TP y en el espacio anular, pero se presenta una expresión más exacta que toma en cuenta la transferencia de líquido. Así, pueden calcularse fácilmente y de manera más precisa la altura del líquido en el espacio anular y la altura inicial del bache.

Pero la acumulación de líquido también se da en el periodo de apertura debido que se toma en cuenta el resbalamiento de líquido durante la carrera ascendente.

Otra diferencia con el modelo presentado por Lea² es la consideración del resbalamiento del líquido, que en este caso es tomado en cuenta y depende únicamente de dos factores: la velocidad de ascenso del pistón y el tipo de pistón. Asimismo, conociendo el resbalamiento de líquido puede calcularse la altura del bache durante cualquier punto en la carrera ascendente.

Durante el periodo de apertura también se tiene acumulación de líquido proveniente del yacimiento, pero en esta ocasión, durante la carrera ascendente, debido a que la tubería de revestimiento permanece cerrada el líquido fluye preferentemente hacia el interior de la tubería de producción.

Finalmente, durante el periodo de purga de gas también se mejoró el enfoque de Lea², ya que él asumió un exponente de $n=1$ para la ecuación de contrapresión y establece que la producción de líquido es función del aporte de gas de la formación y la relación gas-líquido (RGL). Sin embargo, el valor del exponente no es razonable y la RGL depende de la presión de fondo fluyendo. Con el nuevo modelo, ambas suposiciones son eliminadas para mejorar la predicción ya que se utiliza una correlación para calcular la presión de fondo fluyendo y con ella se calcula directamente la producción de líquido. Posteriormente, al integrar variables adimensionales al análisis, la altura del líquido acumulado dentro de la TP puede calcularse.

Como conclusión, al tomar en cuenta los distintos mecanismos de acumulación de líquido, tanto en la TP como en el espacio anular, el cálculo del tamaño del bache es más cercano al valor real, mejorando la eficiencia del modelo.

Gracias a este modelo, la producción total (líquido más gas), la velocidad del pistón y su posición son características de las cuales se puede tener una mejor estimación.

Posteriormente, se revisaron cuatro escenarios distintos de explotación con la finalidad de encontrar aquél que maximizara la producción de gas; escenarios de los cuales, algunos tuvieron que ser revisados bajo distintas condiciones para asegurar que se tuviera un abanico más amplio de los posibles resultados y seleccionar aquellas condiciones que maximizaran el valor del proyecto.

Resultado de las pruebas de cierre y apertura, las limitaciones del pozo en cuestión de presiones máximas y mínimas y los tiempos que le lleva alcanzar dichas presiones se muestran en la *tabla 4.3*. Asimismo se muestran las presiones en la tubería de producción (P_t) y en la tubería de revestimiento (P_c); el tiempo que le lleva al pozo alcanzar la presión máxima se representa con t_c y ése será el tiempo de cierre; por otra parte, el tiempo que le lleva al pozo alcanzar la presión mínima será el tiempo de apertura (t_{op}).

$P_{c,min}$ (MPa)	6.8	$P_{c,max}$ (MPa)	7.3
$P_{t,min}$ (MPa)	1.2	$P_{t,max}$ (MPa)	2.7
t_c (s)	3300	t_{op} (s)	1380

Tabla 4.3 Limitaciones del pozo

Con base en estos datos se investigan los cuatro distintos escenarios de producción. Con ayuda de una computadora el trabajo se facilita y se pueden explorar tantas opciones como sea necesario para obtener aquélla que maximice el valor deseado.

Los mejores resultados obtenidos bajo los cuatro distintos escenarios se muestran en la *tabla 4.4*. En el escenario 1 se tiene la menor producción de gas y de líquido, siendo éstas $14,789 \text{ m}^3/\text{d}$ de gas y $19 \text{ m}^3/\text{d}$ de líquido.

En el escenario 2 se tienen tiempos más cortos: 2,600 segundos de cierre y 1,088 segundos de apertura, y con esos cambios se logra incrementar la producción de gas a $16,227 \text{ m}^3/\text{d}$, y la producción de líquido se incrementa a $29 \text{ m}^3/\text{s}$. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que lo que se busca es maximizar la producción de gas.

El escenario 3 genera una opción en la que los tiempos son aún más cortos y operando con las presiones máximas se logra una producción diaria de gas de $20,477 \text{ m}^3/\text{d}$ y la producción de líquido disminuye para un valor de producción diaria de $27 \text{ m}^3/\text{d}$.

Escenario 1				Escenario 2			
tc (s)	3300	top (s)	1380	tc (s)	2600	top (s)	1088
P _{c,max} (MPa)	7.3	P _{t,max} (MPa)	2.7	P _{c,max} (MPa)	7.19	P _{t,max} (MPa)	2.53
P _{c,min} (MPa)	6.8	P _{t,min} (MPa)	1.2	P _{c,min} (MPa)	6.8	P _{t,min} (MPa)	1.2
Q _g (m ³ /d)	14789	Q _l (m ³ /d)	19	Q _g (m ³ /d)	16227	Q _l (m ³ /d)	29
Escenario 3				Escenario 4			
tc (s)	1750	top (s)	732	tc (s)	1750	top (s)	732
P _{c,max} (MPa)	7.3	P _{t,max} (MPa)	2.7	P _{c,max} (MPa)	7.3	P _{t,max} (MPa)	2.7
P _{c,min} (MPa)	7.03	P _{t,min} (MPa)	2.26	P _{c,min} (MPa)	7.03	P _{t,min} (MPa)	2.26
Q _g (m ³ /d)	20477	Q _l (m ³ /d)	27	Q _g (m ³ /d)	20477	Q _l (m ³ /d)	27

Tabla 4.4 Resultados de los cuatro escenarios

Donde

P_{c,max}: presión máxima en la tubería de revestimiento

P_{c,min}: presión mínima en la tubería de revestimiento

P_{t,max}: presión máxima en la tubería de producción

P_{t,min}: presión mínima en la tubería de producción

Q_g: gasto de gas

Q_l: gasto de líquido

tc: tiempo del periodo de cierre

top: tiempo del periodo de apertura

Finalmente, el escenario 4, después de variar las presiones máximas y mínimas, de generar varias opciones y analizarlas, concluye que la mejor opción se obtiene cuando se mantienen las presiones de operación máximas, de manera que acortar más el ciclo no genera ningún beneficio y utilizar una presión menor a la máxima permisible disminuye la producción de gas. Esto conlleva a las condiciones del escenario 3, pero debe tenerse en cuenta que este resultado es específicamente para este ejemplo de aplicación, para unos datos de entrada distintos, no necesariamente se tiene el mismo resultado en ambos escenarios.

Así, se llega a la conclusión de que con una presión máxima y mínima en la tubería de producción de 2.7 MPa y 2.26 MPa respectivamente, y una presión máxima y mínima en la tubería de revestimiento de 7.3 MPa y 7.03 MPa respectivamente, se logra mayor producción de gas en el menor tiempo.

Este nuevo modelo dinámico describe el movimiento del pistón dentro de la tubería de producción a partir de los cambios en las presiones de las tuberías de producción y de revestimiento, el resbalamiento del líquido y las fuerzas de resistencia del émbolo. Al analizar las curvas de presión se puede describir el comportamiento del método de una mejor manera que los modelos que consideran presiones constantes.

La posición y la velocidad del émbolo son variables calculadas por el modelo durante ambas carreras a partir de datos de campo que se ingresan al modelo. Los resultados del modelo para estas variables permiten tener una clara idea del comportamiento del pistón mientras se desplaza dentro de la tubería de producción. Al graficar dichos valores pueden observarse incrementos y decrementos súbitos en la velocidad y la relación de cambio en la posición con respecto al tiempo permitiendo así el análisis efectivo del comportamiento. Con los datos de posición se puede, por ejemplo, verificar si el émbolo realiza completas las carreras ascendente y descendente.

Mediante un análisis de los resultados del modelo se pueden maximizar o minimizar algunos parámetros importantes y, como pudo observarse al comparar los resultados del modelo con los datos de campo para las condiciones iniciales del pozo, el modelo arroja valores muy cercanos a los valores reales logrando una predicción satisfactoria.

IV.2 Análisis del modelo dinámico con datos de émbolo inteligente

El modelo de Chava, Falcone y Teodoriu³ tiene la ventaja de ser simple debido a que los autores decidieron analizar el método desde sus principios más básicos e ir incrementando la dificultad poco a poco. Sin embargo, desarrollar un modelo tan sencillo restringe su certeza, aunque abre la posibilidad a futuras mejoras del método. Por tanto, este nuevo enfoque puede y debe ser mejorado para lograr una representación fidedigna del comportamiento del pistón.

Parte de estas mejoras son brindar componentes más realísticos en las ecuaciones, evitar asumir flujo estado estacionario en las cuatro regiones del pozo, incluir una caracterización de la región del yacimiento cercana al pozo, eliminar suposiciones e incrementar la información de entrada al modelo, como puede ser la aceleración del pistón que pudiese ser medida al agregar un acelerómetro al émbolo inteligente.

Para lograr su objetivo, los autores utilizaron los datos, de presión y temperatura, medidos en tiempo real por un émbolo viajero con la finalidad de

eliminar algunos parámetros de entrada al modelo y reducir variables que deben ser estimadas o ajustadas, para optimizar la confiabilidad de los datos con que se utiliza el modelo y obtener mejores resultados.

Para validar un modelo existen dos opciones, la primera es verificar los resultados del modelo en puntos específicos en los que se conoce o se puede inferir algún valor que el modelo dé como resultado; por ejemplo, la altura de la región encima del pistón debe ser cero cuando éste se encuentra en el lubricador y la altura de la región que está por debajo del pistón debe ser cero cuando éste se encuentra en el fondo del pozo; si estos valores se cumplen se puede verificar que el modelo funciona correctamente. Otra manera de verificar la validez del modelo es tomar algunas variables conocidas como incógnitas y el modelo debe ser capaz de replicar los valores lo más cerca de la realidad.

Una de las restricciones de este modelo es que solamente es aplicable para la carrera ascendente. Además, asume un tamaño de bache constante, por lo que el modelo deja de ser válido en el momento en que el bache llega a la superficie y comienza la producción del líquido.

En el modelo de 2008 aparece otra restricción. Éste toma valores puntuales para la densidad del gas en el espacio anular, la densidad del gas en la superficie y la densidad del gas justo sobre el bache para un periodo de tiempo. En el modelo de 2009, los autores presentan una mejora al método en la que se toman valores promedio para la densidad del gas, ya sea un promedio en el tiempo, es decir, al principio y al final del periodo de tiempo, o bien en el espacio anular se toma un promedio de la densidad del gas a condiciones de superficie y a condiciones de fondo de la columna de gas, justo en donde se tiene el nivel del líquido.

Con estas mejoras, se logra que la densidad de la mezcla sea también un promedio y los valores de la velocidad del pistón mejoran considerablemente. Aunado a esto, los valores de la velocidad del pistón también toman valores promedio para un periodo de tiempo y así se logra una mejor representación de los valores de estas variables.

Otra limitación del modelo que podría mejorarse o analizar bajo circunstancias distintas es que solamente considera la situación en la que el yacimiento y el espacio anular contribuyen de manera similar al levantamiento del pistón. Esto es, ambos tienen energías similares y por lo tanto aportan fluidos al interior de la tubería de producción de manera semejante, y además el espacio anular en ningún momento queda vacío.

A continuación se presenta una comparación de algunos de los métodos anteriores con el presente modelo para cotejar los resultados y validar la eficiencia del nuevo modelo dinámico con datos del émbolo viajero inteligente.

El modelo estático que presentaron Foss y Gaul⁴ en 1965 se enfoca en describir la carrera ascendente por medio de correlaciones empíricas y cartas de desempeño de acuerdo a la experiencia obtenida en el Campo Ventura Avenue en California, EUA. Algunas diferencias importantes se muestran en la *tabla 4.5*.

COMPARACIÓN DE FACTORES Y CONSIDERACIONES PARA AMBOS MODELOS		
Parámetro	Foss & Gaul	Chava et al.
Tipo de modelo	Estático	Dinámico
Tipo de yacimiento	Aceite	Gas
Velocidad para la carrera ascendente	Constante (1'000 pie/min)	Calculada por el modelo
Velocidad para la carrera descendente	Constante (gas=2'000 pie/min) (líquido=172 pie/min)	No aplica
Viscosidad del líquido	< 30 °API	10 °API (agua)
Densidad específica del gas	0.72	Variable
Mínima presión en la TR	Cuando el pistón y el bache están cerca de la superficie	Calculada por el modelo

Tabla 4.5 Diferencias entre el modelo de Foss & Gaul⁴ y el de Chava *et al.*³

Implementando el modelo de Foss y Gaul⁴ con los datos del campo del este de Texas, EUA, utilizados en la validación del modelo dinámico, se predijo una presión mínima requerida en la tubería de revestimiento de 519 lb/pg² y utilizando el nuevo modelo dinámico de Chava *et al.*³ se obtuvo un valor de 373 lb/pg². Con esto es posible demostrar que el modelo de Foss y Gaul⁴ es mucho más conservador que el nuevo modelo a la hora de calcular los requerimientos del método, sobrestimando el valor en 39.14% con respecto al valor del nuevo modelo. Consecuentemente, el nuevo método es más realista, por lo tanto, permite reducir las condiciones de presión que se encuentran sobrestimadas por el modelo de 1965, proponiendo condiciones de operación no sólo más realistas, sino de menor riesgo, menor costo y mayor seguridad.

El modelo presentado por Gasbarri⁵ en 1996 incluye los efectos del separador y de la línea de descarga, además de considerar el ciclo de operación del método del pistón viajero completo.

Para comparar el modelo realizado por Gasbarri⁵ y el de Chava *et al.*³ se analizó un pozo del este de Texas con ambos modelos para comparar los resultados. Como se puede observar en la *figura 4.1*, el modelo de Gasbarri⁵ predice un comportamiento similar al de Chava *et al.*³ mostrado en la *figura 4.2*. Ambos muestran un súbito incremento en la velocidad al principio de la carrera

ascendente y un decremento paulatino posterior con un disturbio cerca del final de la carrera ascendente. Sin embargo, el nuevo modelo permite una representación gráfica más precisa y, aunque el modelo de Gasbarri⁵ y de Chava *et al.*³ predicen una velocidad máxima muy parecida (11 m/s y 12 m/s respectivamente) el nuevo modelo es más claro, permitiendo un mejor análisis.

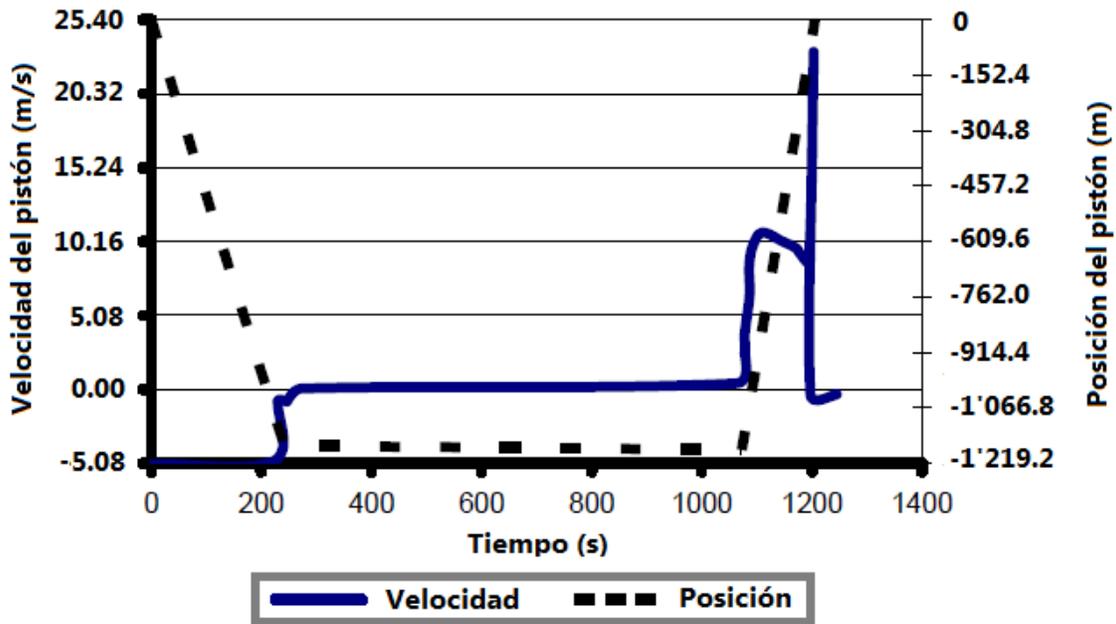


Figura 4.1 Velocidad y posición del émbolo con el modelo de Gasbarri⁵

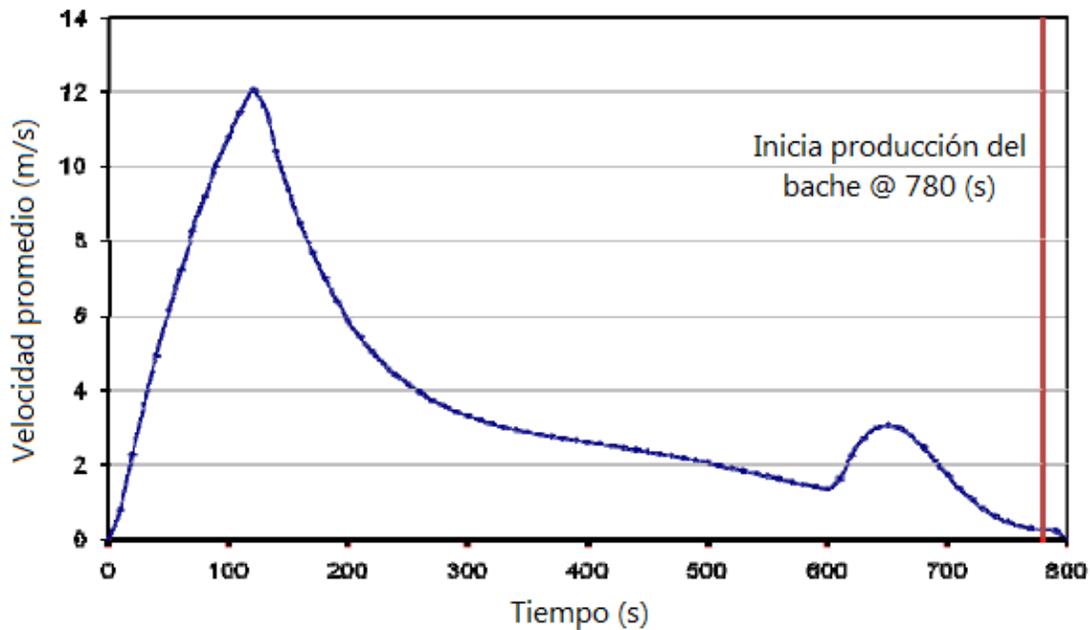


Figura 4.2 Velocidad promedio del pistón calculada por el modelo de Chava *et al.*³ para la carrera ascendente

Una ventaja que tiene este método sobre los demás es que parte de información tomada por el émbolo y esto permite que, simplemente con esta información, puedan monitorearse e identificarse eventos positivos y/o negativos durante el ciclo, como lo son identificar posibles fugas en la tubería, distinguir el momento en que el pistón golpea el líquido durante la carrera descendente, verificar que el pistón llega hasta el resorte de fondo, identificar el momento en que el bache llega a la superficie y el momento en que el émbolo llega al lubricador, entre otros. Y, posteriormente, ayudan al modelado del ciclo para optimizar la recuperación de hidrocarburos.

IV.3 Análisis del modelo mecanicista con datos de émbolo inteligente

El modelo de Bello, Falcone, Xu, Scott y Harrod⁶ fue validado mediante la realización de pruebas con datos del campo Pinedale en Wyoming, EUA. Una de las mejoras más significativas de este método es permitir el análisis de pozos con empacador, para lo cual se llevó a cabo el siguiente procedimiento. Primero, se estudiaron las características del pozo; después, se evaluó el ciclo del pistón viajero; posteriormente, se integraron y normalizaron los datos; a continuación, se modificó el modelo para aplicarlo a pozos con empacador y, finalmente, se aplicó el modelo para evaluar el desempeño del método.

Para estudiar el Pozo Warbornnet 13-4D, un pozo de 12,802 pies de profundidad con empacador y que producía de varias zonas, se aplicó el modelo mecanicista para calcular la velocidad de la carrera ascendente del pistón. Los datos calculados por el modelo siguen un patrón similar al que predice el modelo dinámico de Chava *et al.*³ (*figura 4.3*) que también se basa en datos del pistón viajero, prediciendo un súbito incremento en la velocidad al inicio de la carrera, alcanzando la velocidad máxima al principio del ascenso; posteriormente, la velocidad disminuye por efectos de fricción y fuerzas gravitatorias hasta el momento en que comienza la producción del bache.

Un análisis de la *figura 4.3* sugiere que el émbolo llega a la superficie con una velocidad ligeramente elevada. Un ciclo óptimo, se define como aquél que aprovecha la energía al máximo. Para lograr lo anterior, el periodo de cierre debe ser lo más corto posible, de manera que le permita al émbolo llegar a la superficie con una velocidad igual a cero. De esta manera no se desperdicia energía y se aprovechan al máximo los recursos del yacimiento.

Lograr que el pistón llegue a superficie con una velocidad exactamente de cero no es fácil de lograr y predecir para todos los ciclos. Además, se debe tener un factor de seguridad, ya que proponer que el émbolo llegue con una velocidad

exactamente de cero puede provocar que tras un periodo corto de operación, la carrera ascendente no se realice por completo debido a un cambio en las condiciones del yacimiento, provocando así un mal funcionamiento del método y una pérdida de valor para la compañía. Es por eso que se debe buscar que el pistón llegue a superficie con una velocidad ligeramente superior a cero.

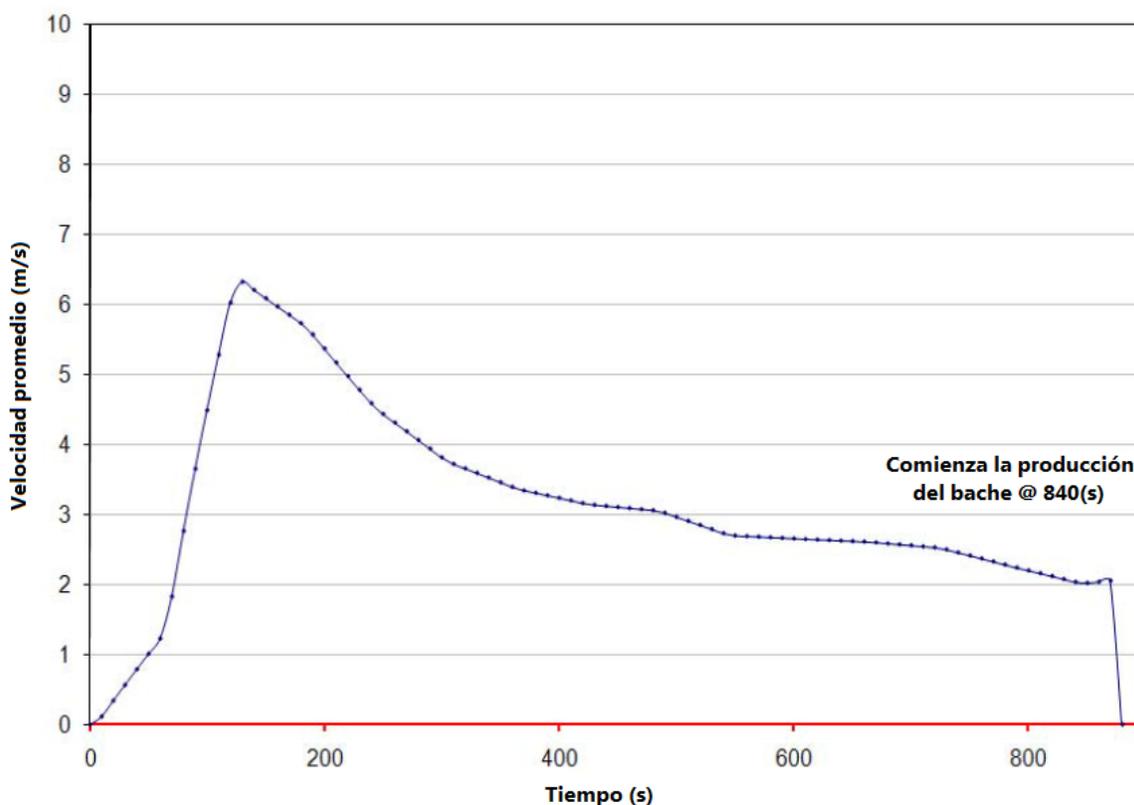


Figura 4.3 Velocidad promedio del pistón calculada por el modelo de Bello *et al.*⁶ para la carrera ascendente

Si se observa la *figura 4.3*, es posible detectar que la velocidad con que llega el sistema émbolo-bache a la superficie es de aproximadamente 2 m/s y se alcanza a los 840 segundos. Esta velocidad se considera ligeramente alta sugiriendo un periodo de cierre probablemente demasiado largo que provee una acumulación de energía mayor a la mínima requerida para llevar el pistón hasta la superficie y, por lo tanto, representa un desperdicio innecesario y continuo de energía.

Para analizar otras posibles causas de este problema se realizó un análisis de sensibilidad que demostró que la variable que más afecta la velocidad ascendente del pistón es la densidad específica del gas. Al aumentar la gravedad específica, la velocidad disminuye. Además, la velocidad del gas también tiende a incrementar

conforme aumenta el gasto de producción de gas. Por lo tanto, se llegó a la conclusión de que lo que más impacto tendría sobre los resultados del modelo sería una reinterpretación del comportamiento de afluencia (IPR).

Probablemente, un comportamiento de afluencia más realista podría mejorar los resultados del modelo. Sin embargo, con un esquema de terminación como el del pozo en el que se realizó el estudio no es posible obtener información de mejor calidad, debido a que el pozo tiene varias zonas productoras, de las cuales algunas estaban estimuladas, lo que dificulta un estudio de comportamiento de afluencia demasiado preciso.

Gracias a la implementación del modelo, se puede representar el perfil de la velocidad del pistón durante la carrera ascendente, así como su velocidad promedio, y se pueden conocer parámetros como la altura del bache y con ello el volumen de líquido en el bache, el tiempo de la carrera descendente, el tiempo de la carrera ascendente desde que el pistón está en el fondo del pozo hasta que comienza la producción del bache, el tiempo en que el pistón llega al lubricador y con ello se puede calcular al tiempo de producción del bache, y el tiempo del periodo de purga de gas. Además, con los resultados anteriores se puede calcular el tiempo óptimo del periodo de cierre que, como vimos anteriormente, es el más corto que permita realizar la carrera ascendente por completo y se caracteriza porque la velocidad con la que llega el pistón al lubricador es prácticamente cero.

El método presentado aquí puede ser mejorado para optimizar los resultados si se toma en cuenta la interacción del bache y el pistón con la pared de la tubería de producción. Al tomar en cuenta la fricción que se presenta entre estos elementos durante la carrera ascendente, los resultados del modelo aumentarían su precisión.

Como muchos otros modelos, el aquí presentado no toma en cuenta el resbalamiento del líquido. Una modificación del método en la que se tome en cuenta este fenómeno, que indudablemente ocurre y tiene un efecto notable, puede contribuir a que los resultados del modelo sean más reales.

El análisis de los datos del PI indica el tiempo que requiere la carrera descendente; sin embargo, esto revela que la velocidad con la que cae el pistón es menor a la velocidad estimada por el fabricante. El fabricante provee información en la que estima la velocidad descendente ente 300 y 400 pie/min y los datos del PI muestran un cálculo de velocidad promedio de 197 pie/min.

Con lo anteriormente mencionado, puede concluirse que el modelo prueba ofrecer una metodología factible y práctica para optimizar el funcionamiento del método, maximizar su rendimiento y minimizar sus costos operacionales.

IV.4 Análisis del modelo analítico para el método combinado Pistón Viajero-BNI utilizando tubería flexible

El modelo propuesto por Bello, Falcone, Xu y Scott⁷ estudia una técnica para mejorar el flujo en pozos de gas con problemas de carga de líquido. Esta técnica involucra la inyección de gas a presión en forma cíclica para desplazar la producción en forma de baches de líquido hasta la superficie (BNI) y el método del pistón viajero para aprovechar al máximo la energía disponible al interponer una interface sólida entre el bache y el gas que sirve de empuje, para minimizar los efectos de resbalamiento de líquido.

Al combinar el sistema artificial de producción (SAP) conocido como BNI con el método del pistón viajero, se logra aprovechar las ventajas de cada uno para maximizar la eficiencia del método. Más aún, los autores analizan una variante del BNI convencional en la cual se introduce una tubería flexible en el interior de la tubería de producción para obtener una configuración que aunque es distinta a la convencional, resulta de gran funcionalidad.

Al implementar el modelo se pueden calcular las presiones estáticas de fondo al interior de la tubería flexible y al exterior de la tubería flexible, en el espacio anular. Con esos resultados puede verificarse que si un bache de cierto tamaño puede ser levantado a una cierta presión de inyección de gas, puede calcularse la velocidad de la carrera ascendente con base en la masa del émbolo y del bache, la interacción entre el pistón y la pared de la tubería flexible, la gravedad, la presión y características de la TF en un lapso de tiempo. Otro parámetro que puede calcularse con el modelo es el tiempo total de duración del ciclo que depende del tiempo de duración de la carrera descendente, el tiempo de inyección, el de la carrera ascendente y el del periodo de purga de gas.

Este modelo no presenta comparaciones con datos reales debido a que este estudio se realizó para comprobar la factibilidad de implementar el método en el campo. Es por eso que se presentan distintos escenarios de explotación para predecir el comportamiento del método combinado bajo cada uno de ellos y elegir el más conveniente. Por lo tanto requiere de experimentos de laboratorio o una comparación con una aplicación real para comprobar su aplicabilidad y su correcto funcionamiento.

Los resultados del estudio muestran cálculos para la velocidad de la carrera ascendente, pero para la carrera descendente se necesita el dato proporcionado por el fabricante. Sin embargo, en ocasiones, la velocidad nominal de la carrera descendente no es del todo confiable, como hemos visto en modelos anteriores, es por eso que debe tomarse con reservas.

En cuanto a la capacidad de levantamiento, el modelo también presenta cálculos sencillos y una ventaja es que se pueden evaluar fácilmente varios escenarios cambiando el valor de una variable de entrada, como la presión de inyección. En este caso, se ha visto cómo se incrementa la capacidad de levantamiento de líquido para un bache de 200 pies en un 4.65% al incrementar la presión de inyección de 1,100 lb/pg² a 1,400 lb/pg². Sin embargo, la capacidad de levantamiento disminuye cuando el bache aumenta su tamaño; para un bache del doble de altura (400 pies), el mismo incremento de presión incrementa la capacidad de levantamiento por ciclo en 2.56%, y si el bache triplicara su altura con respecto al primero (600 pies), la capacidad de levantamiento tan sólo sería de 0.87%.

Otra ventaja del método es que es posible calcular la mínima presión de inyección del gas necesaria para levantar un bache de un tamaño dado o, por el contrario, se puede saber cuál es el bache de mayor tamaño que una cierta presión de inyección será capaz de levantar hasta la superficie.

Los resultados del método podrían mejorar si se tuviera información sobre las características del yacimiento como su presión y su comportamiento de afluencia. En esta ocasión, el modelo se aplicó suponiendo la altura del bache y suponiendo que el yacimiento produce constante e ininterrumpidamente acumulando líquido en el espacio anular TR-TP y produciendo el gas por la tubería de revestimiento; pero, conociendo las características reales del yacimiento, la caída de presión a través de la válvula de pie y el tiempo de duración de la carrera descendente, podría calcularse la altura real del bache.

El análisis económico es una parte muy importante al implementar un método combinado de Pistón Viajero-BNI, debido al costo del gas y de su compresión, las instalaciones superficiales requeridas y demás aditamentos relacionados con el BNI. En esta ocasión, según los autores, una alta presión de inyección y un bache de menor tamaño son las condiciones que dan la mejor capacidad de levantamiento y la mejor relación costo-beneficio.

El análisis general del método, demuestra la factibilidad de combinar el Pistón Viajero con el BNI utilizando tubería flexible para inyectar el gas a presión por el espacio anular TP-TF y produciendo con ayuda del émbolo por el interior de la tubería flexible. Esta configuración no ha sido contemplada por modelos anteriores que toman en cuenta la combinación del método en su manera convencional, inyectando el gas por el espacio anular TR-TP y pasando al interior de la tubería de producción mediante las válvulas comúnmente utilizadas en el BN. Es ésa la importancia de este modelo.

Finalmente, se puede concluir que poder combinar el Pistón Viajero con el BNI es una ventaja, porque el BN es uno de los sistemas artificiales de producción más utilizados en la industria. Valerse de tubería flexible para el sistema combinado PV-BNI permite utilizar un modelo simple para el modelado del método porque no se necesitan válvulas de inyección para comunicar el espacio anular y el interior de la tubería flexible.

Además, se demostró que en el sistema combinado PV-BNI la capacidad de levantamiento depende directamente del gasto de inyección de gas a presión y de la presión de inyección del gas. Inyectar el gas a mayor presión así como inyectar gas a un mayor gasto, son condiciones que aumentan la eficiencia.

Por último, el modelo presentado para la aplicación PV-BNI no requiere las condiciones del yacimiento para funcionar, sólo necesita que se asuma un tamaño de bache a levantar, pero si se conoce el aporte de fluidos por parte del yacimiento, éstas pueden ocuparse para mejorar el desempeño del modelo.

IV.5 Discusión sobre los resultados de los modelos

Los modelos presentados tienen características que los distinguen entre sí. La *tabla 4.6* compara las características más relevantes y muestra algunas particularidades que son distintivas de cada modelo. Por ejemplo, al analizar la tabla puede observarse que solamente dos modelos toman en cuenta la fricción generada por el bache y por el émbolo con las paredes de la tubería durante la carrera ascendente. Dichos modelos son el dinámico de Tang y Liang¹ y el analítico de Bello *et al.*⁷

El único que toma en cuenta el resbalamiento del líquido es el modelo dinámico de Tang y Liang¹. Sin embargo, ninguno de ellos toma en cuenta el resbalamiento de gas por el émbolo, es decir, el gas que puede subir por el espacio comprendido entre la pared externa del pistón y la parte interna de la tubería. Este efecto fue tomado en cuenta en el primer modelo de Foss y Gaul⁴, pero desaparece en los nuevos modelos.

Por otra parte, la velocidad del émbolo durante la carrera ascendente es considerada variable en todos los modelos, es decir, puede calcularse en cualquier punto durante el ascenso, y la velocidad tendrá distintos valores dependiendo de dónde se encuentre. Mientras tanto, la velocidad de la carrera descendente se calcula como un promedio y se considera constante. Cabe mencionar que algunos modelos pueden distinguir entre la velocidad del pistón cayendo en el gas y la

velocidad del pistón en el líquido durante la carrera descendente, pero por simplicidad toman un valor promedio para toda la carrera.

Durante la carrera ascendente, el ciclo óptimo se considera como aquél en el cual la velocidad de arribo del pistón a la superficie es cero. Ya que si la velocidad fuese cero antes de llegar a la superficie, la carrera no se realizaría por completo y el pistón comenzaría la caída libre en el gas antes de tiempo, lo que sería un mal funcionamiento del método. Por otro lado, si la velocidad de llegada es superior a cero, quiere decir que durante el periodo de cierre se acumula más energía de la mínima requerida para levantar el pistón, desperdiciando así energía. Es por eso que debe buscarse que el pistón llegue con una velocidad ligeramente superior a cero al lubricador.

De ahí que calcular una velocidad variable cobra importancia al analizar el método, ya que puede calcularse la velocidad en puntos intermedios de la carrera ascendente, aunque también puede calcularse la velocidad con la que llega al lubricador para verificar que la energía del yacimiento se esté aprovechando al máximo.

Al considerar la velocidad de llegada a la superficie debe tenerse presente que tanto el modelo dinámico de Chava *et al.*³ como el modelo mecanicista de Bello *et al.*⁶, consideran un bache de tamaño constante, por lo que a partir de la llegada del bache a la superficie pierden validez. En ese momento, la velocidad se reduce abruptamente debido a la fricción local que se genera en la cabeza al producir el bache de líquido. Conforme el bache se produce, la altura del bache disminuye y se reduce la carga de líquido, provocando un rápido incremento en la velocidad que no es tomado en cuenta más que en el modelo dinámico de Tang y Liang¹.

Sin embargo, el modelo de Tiang y Liang¹ difiere de los demás en la predicción del perfil de velocidad durante la carrera ascendente. En él, la velocidad tiene un fuerte incremento al inicio de la carrera pero después tiende a estabilizarse y continúa incrementando lentamente hasta que el bache llega a la superficie. Los autores argumentan que dicho comportamiento se debe a que el fenómeno de resbalamiento de líquido, no tomado en cuenta por ninguno de los otros modelos, provoca una disminución considerable en el peso de la columna de líquido que permite al gas comprimido bajo el pistón, elevarlo de esa manera. Los modelos que utilizan información de un pistón inteligente (PI) predicen un perfil de velocidades distinto. En éste, la velocidad sí tiene un fuerte incremento al principio de la carrera, en el que inclusive se alcanza la velocidad máxima; pero, posteriormente, la velocidad decrece paulatinamente hasta llegar a un valor cercano a cero cuando el bache comienza a producirse.

#	Autor	Año	Tipo de modelo		Fricción del bache	Fricción del émbolo	Peso de la columna de gas	Resbalamiento del líquido
1	Tang y Liang	2008	Dinámico		✓	✓	✓	✓
2	Chava, Falcone y Teodoriu	2008-2009	Dinámico con datos de émbolo inteligente		X	X	✓	X
3	Bello, Falcone, Xu, Scott y Harrod	2011	Mecánico con datos de émbolo inteligente		X	X	✓	X
4	Bello, Falcone, Xu y Scott	2011	Analítico		✓	✓	✓	X
#	Resbalamiento de gas por el émbolo	Velocidad ascendente	Velocidad descendente	Presión en la cabeza del pozo	Modelado de acumulación de líquido	Empacador	Flujo	Comparado con una aplicación real
1	X	Variable-calculada	Constante-calculada	Variable	✓	X	Estacionario	✓
2	X	Variable-calculada	Constante-calculada	Variable	X	X	Estacionario	✓
3	X	Variable-calculada	Constante-calculada	Variable	X	✓	Estacionario	✓
4	X	Variable-calculada	Constante-calculada	Variable	X	X	Estacionario	X
#	Comparado con una aplicación real	Condiciones variables del yacimiento	Requiere la ecuación de contrapresión	Ecuación de producción de líquido del yacimiento	Corte de agua	Interacción entre las regiones del pozo. Caso.Opción	Se vacía el EA durante la apertura	Aplicación
1	✓	✓	✓	✓	100%	1.1	X	Pozos de gas
2	✓	✓	✓	X	100%	1.1	X	Pozos de gas
3	✓	✓	✓	X	100%	1.2, 2.3	✓	Pozos de gas
4	X	✓	X	X	100%	1.2, 2.2	✓	Pozos de gas con BNI por TF

Tabla 4.6 Comparación de modelos

Tras analizar los perfiles de velocidad, el más adecuado parece ser el que tiene un incremento brusco al inicio, en el que se alcanza la velocidad máxima, seguido de un decremento continuo en la velocidad debido a efectos gravitacionales y de fricción, porque seguir incrementando la velocidad implica una gran pérdida de líquido por resbalamiento y la función del pistón es justamente minimizar este efecto. Además, para obtener ese perfil, se considera que la fricción es nula.

Otra particularidad del modelo de Tiang y Liang¹ es que son el único modelo que puede predecir el comportamiento de la velocidad cuando comienza la producción de líquido. Este comportamiento comienza con una caída repentina de la velocidad al llegar el bache a la superficie y posteriormente un rápido incremento en la velocidad. El argumento de los autores en esta ocasión es que al llegar a la cabeza existe un incremento en la fricción local que conlleva a la disminución repentina, pero, al comenzar la producción se presenta una reducción en la presión generada por la columna de fluido ya que el bache disminuye su tamaño, lo que provoca un rápido incremento en la velocidad a partir de ese momento y hasta que se termina de producir el bache y el pistón llega al lubricador.

Esta situación, analizada por los autores del nuevo modelo dinámico, debe ser tomada en cuenta al calcular la velocidad de llegada del pistón a superficie con los otros modelos, porque ellos terminan al llegar el bache a superficie y si se trata de lograr que esa velocidad sea muy cercana a cero, puede causar problemas cuando se dé la fuerte caída de velocidad debido al aumento en la fricción local.

Dos características relevantes del modelo analítico de Bello *et al.*⁷, son que puede utilizarse sin una ecuación de aporte de fluidos por parte del yacimiento asumiendo el tamaño del bache y que es el único modelo que no presenta una aplicación real. Sin embargo, tener ecuaciones que describan el comportamiento del yacimiento es de gran importancia para el correcto funcionamiento de los modelos. No obstante, en pozos con múltiples zonas productoras es difícil modelar matemáticamente la producción del yacimiento.

En la *tabla 4.6* se muestra el tipo de interacción que se presenta entre las regiones del sistema durante la carrera ascendente. A continuación se presentan los distintos escenarios.

Caso 1. El nivel del líquido en el espacio anular se mantiene por encima de la boca de la tubería por la que se produce.

Caso 2. El nivel del líquido en el espacio anular ha alcanzado la boca de la tubería por la que se produce.

Los casos anteriores ilustran si el espacio anular queda vacío en algún momento durante la producción. Además, cada caso cuenta con tres posibles opciones de acuerdo a la contribución que tienen el espacio anular y el yacimiento al levantamiento del pistón.

Opción 1. Ambos –el espacio anular y el yacimiento– cuentan y contribuyen de manera similar con energía para levantar al pistón de manera que ambos fluyen hacia el interior de la tubería de producción.

Opción 2. El espacio anular cuenta con más energía que el yacimiento, de manera que es el espacio anular el que contribuye principalmente al levantamiento.

Opción 3. El yacimiento cuenta con más energía que el espacio anular de manera que es el yacimiento el que contribuye principalmente al levantamiento.

A continuación se muestra la *tabla 4.7* en la que pueden apreciarse las ventajas y desventajas que presenta cada modelo. En seguida se muestra la *tabla 4.8* que compara las ventajas y desventajas del pistón convencional y las del pistón inteligente, de tal manera que para tomar la decisión de utilizar un PI deben evaluarse ambas tablas para conocer las ventajas tecnológicas que aporta por sí mismo el pistón y las ventajas adicionales que se tendrían al utilizar un modelo matemático desarrollado con base en los datos obtenidos del PI.

Se puede concluir que el PI además, de servir de interface sólida para la carrera ascendente, mantener libre de impurezas las paredes de la tubería y proporcionar datos de presión y temperatura para implementar un modelo que describa el funcionamiento del método, también proporciona información acerca del patrón de funcionamiento del ciclo en el que pueden identificarse situaciones importantes, por ejemplo, muestra si el pistón llega a la superficie durante la carrera ascendente, si el pistón llega al fondo durante la carrera descendente, y, por otro lado, muestra cuando el pistón entra en el líquido durante la carrera descendente y cuando el bache llega a la superficie, entre otras.

Además, el pistón inteligente desprecia algunos parámetros, como la fricción entre el émbolo y las paredes de la tubería, pero demuestra sus efectos.

	Ventajas	Desventajas
Modelo dinámico	<ul style="list-style-type: none"> * Toma en cuenta todo el ciclo. * Toma en cuenta la fricción del bache y del pistón. * Toma en cuenta el resbalamiento de líquido. * Modela el aporte de líquido por parte del yacimiento. * Modela la acumulación de líquido. * Requiere pocos datos. 	<ul style="list-style-type: none"> * Requiere datos de una prueba de cierre y apertura. * Aplica solo para pozos de gas. * Asume que el líquido producido es 100% agua.
Modelo dinámico con PI	<ul style="list-style-type: none"> * Simple. * Fácil de programar. * Muestra efectos gravitacionales y de fricción aunque no los toma en cuenta en las ecuaciones. * Perfil de velocidad realista. * Requiere pocos datos. 	<ul style="list-style-type: none"> * Solo modela la carrera ascendente hasta el inicio de la producción del bache. * Aplica solo para pozos de gas. * Asume que el líquido producido es 100% agua. * Requiere datos medidos por un pistón inteligente. * No cuantifica la fricción del bache ni del pistón. * Desprecia el resbalamiento de líquido.
Modelo mecanicista con PI	<ul style="list-style-type: none"> * Puede utilizarse en pozos con empacador. * Simple. * Fácil de programar. * Muestra efectos gravitacionales y de fricción aunque no los toma en cuenta en las ecuaciones. * Perfil de velocidad realista. * Requiere pocos datos. 	<ul style="list-style-type: none"> * Solo modela la carrera ascendente hasta el inicio de la producción del bache. * Aplica solo para pozos de gas. * Asume que el líquido producido es 100% agua. * Requiere datos medidos por un pistón inteligente. * No cuantifica la fricción del bache ni del pistón. * Desprecia el resbalamiento de líquido.
Modelo analítico con TF	<ul style="list-style-type: none"> * Toma en cuenta la combinación del Pistón Viajero con el BNI utilizando tubería flexible. * Toma en cuenta la fricción del bache y del pistón. 	<ul style="list-style-type: none"> * No hay aplicación con datos reales. * Requiere una mayor cantidad de datos. * Aplica solo para pozos de gas. * Asume que el líquido producido es 100% agua. * Desprecia el resbalamiento de líquido.

Tabla 4.7 Ventajas y desventajas de los modelos

	Ventajas	Desventajas
Pistón convencional	* Bajo costo.	* Ajuste de parámetros debe hacerse manualmente. * No contempla cambios en las condiciones de operación y dificulta la optimización constante del ciclo.
Pistón inteligente	* Registra datos de P y T a lo largo de toda la tubería de producción. * No requiere capacitación extra para el personal operador. * Evita realizar registros de producción. * Registra información útil para interpretar, analizar y evaluar el método (producción). * Calcula velocidades promedio del pistón. * Permite automatización y contempla cambios en las condiciones de operación para la optimización del ciclo.	* El costo puede duplicar al de un pistón convencional.

Tabla 4.8 Pistón convencional vs Pistón inteligente

Hoy en día se tiene una gran variedad de pistones y modelos que describen el funcionamiento del pistón inteligente, por lo que se recomienda buscar entre los distintos pistones y los diferentes modelos el que mejor se ajuste a las condiciones prevaletentes en el pozo y en el yacimiento, para así obtener los mejores resultados.

Si se busca un mejor monitoreo del pozo, se puede utilizar un modelo para prever el funcionamiento y posteriormente implementar un pistón inteligente para verificar que el método funcione correctamente.

Para terminar, es importante señalar la importancia de seleccionar la mejor opción técnica y económica. Los modelos ayudan al operador a encontrar la mejor opción técnica, pero puede ser que implementarla no sea económicamente viable, ocasión en que no deberá ser elegida.

Lista de figuras

Figura 4.1 Velocidad y posición del émbolo con el modelo de Gasbarri. CHAVA, G. K.; FALCONE, G. y TEODORIU, C. *Plunger Lift Modeling Towards Efficient Liquid Unloading in Gas Wells*. SPE 124515, 2009.

Figura 4.2 Velocidad promedio del pistón calculada por el modelo de Chava *et al.* para la carrera ascendente. CHAVA, G. K.; FALCONE, G. y TEODORIU, C. *Plunger Lift Modeling Towards Efficient Liquid Unloading in Gas Wells*. SPE 124515, 2009.

Figura 4.3 Velocidad promedio del pistón calculada por el modelo de Bello *et al.* para la carrera ascendente. BELLO, O.; FALCONE, G.; XU, J.; SCOTT, S. y HARROD, J. *Evaluation of Liquid Loading in the Pinedale Field: Integration of Smart Plunger Data and Mechanistic Modeling*. SPE 141250, 2011.

Lista de tablas

Tabla 4.1 Datos de campo. TANG, Y. y LIANG, Z. *A New Method of Plunger Lift Dynamic Analysis and Optimal Design for Gas Well Deliquification*. SPE 116764, 2008.

Tabla 4.2 Resultados del modelo. TANG, Y. y LIANG, Z. *A New Method of Plunger Lift Dynamic Analysis and Optimal Design for Gas Well Deliquification*. SPE 116764, 2008.

Tabla 4.3 Limitaciones del pozo. TANG, Y. y LIANG, Z. *A New Method of Plunger Lift Dynamic Analysis and Optimal Design for Gas Well Deliquification*. SPE 116764, 2008.

Tabla 4.4 Resultados de los cuatro escenarios. TANG, Y. y LIANG, Z. *A New Method of Plunger Lift Dynamic Analysis and Optimal Design for Gas Well Deliquification*. SPE 116764, 2008.

Tabla 4.5 Diferencias entre el modelo de Foss & Gaul y el de Chava *et al.* CHAVA, G. K.; FALCONE, G. y TEODORIU, C. *Plunger Lift Modeling Towards Efficient Liquid Unloading in Gas Wells*. SPE 124515, 2009.

Tabla 4.6 Comparación de modelos.

Tabla 4.7 Ventajas y desventajas de los modelos.

Tabla 4.8 Pistón convencional vs Pistón inteligente.

Referencias

1. TANG, Y. y LIANG, Z. *A New Method of Plunger Lift Dynamic Analysis and Optimal Design for Gas Well Deliquification*. SPE 116764, 2008.
2. LEA, J. F. *Dynamic Analysis of Plunger Lift Operations*. Journal of Petroleum Technology 2616-2629, 1982.
3. CHAVA, G. K.; FALCONE, G. y TEODORIU, C. *Development of a New Plunger-Lift Model Using Smart Plunger Data*. SPE 115934, 2008.
4. FOSS, D. L. y GAUL, R. B. *Plunger – Lift Performance Criteria With Operating Experience – Ventura Avenue Field*. Drilling and Production Practices, API, 1965.
5. GASBARRI, S. *Development of a Plunger Lift Model for Gas Wells*, tesis de maestría. Oklahoma, Universidad de Oklahoma, 1996.
6. BELLO, O.; FALCONE, G.; XU, J.; SCOTT, S. y HARROD, J. *Evaluation of Liquid Loading in the Pinedale Field: Integration of Smart Plunger Data and Mechanistic Modeling*. SPE 141250, 2011.
7. BELLO, O.; FALCONE, G.; XU, J. y SCOTT, S. *Performance Evaluation of a Plunger Assisted Intermittent Gas Lift System*. SPE 141251, 2011.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



Conclusiones

Tras analizar y comparar cuatro de los más recientes modelos desarrollados para describir el comportamiento del pistón viajero, dos de los cuales toman en cuenta arreglos que no se habían previsto antes, pozos con empacador y el uso de tubería flexible en un sistema combinado PV-BNI, se obtienen las siguientes conclusiones:

- 1) Tomar en cuenta las variaciones en las presiones superficiales ha permitido mejorar significativamente la precisión de los modelos, como en el caso de los cuatro modelos presentados en este trabajo.
- 2) El modelo dinámico de Tang y Liang¹ tiene la ventaja de tomar en consideración la carrera ascendente completa, esto es, desde que el pistón comienza a subir por la TP hasta que llega al lubricador, tomando en cuenta la producción del bache.
- 3) Algunos modelos se enfocan en describir únicamente la carrera ascendente. Pero no deben despreciarse las demás etapas del ciclo ya que son el complemento del método y también en las demás etapas pueden obtenerse datos importantes.
- 4) En los modelos presentados se distinguen dos perfiles de velocidad distintos. El primero en el que el pistón tiene un incremento brusco en la velocidad al inicio de la carrera ascendente seguido de un periodo estable en el que la velocidad sigue incrementando con una pendiente poco pronunciada gracias al resbalamiento de líquido. Mientras en el segundo perfil se tiene el mismo inicio con un incremento brusco en la velocidad en el que se alcanza la velocidad máxima, seguida de un decremento continuo en la velocidad debido a efectos gravitacionales y de fricción.
- 5) Los modelos creados con base en datos del pistón viajero tienen la desventaja de perder validez en el momento en que el bache llega a la superficie y comienza la producción del líquido. Esto es debido a que la posición depende de la velocidad y la velocidad depende de la producción de gas.
- 6) Los datos medidos por el pistón inteligente han sentado las bases para desarrollar modelos sencillos que caractericen la operación del modelo. Sin embargo, necesitan mejorar para ser más realistas aunque en la actualidad hayan comprobado tener un desempeño aceptable.

- 7) Los pistones inteligentes son de gran utilidad para el análisis del método de Pistón Viajero una vez que está en funcionamiento debido a que implica un mejor monitoreo del pozo que se traduce en una optimización de la producción y un incremento en el valor del proyecto.
- 8) El modelo analítico de Bello *et al.*² no ha sido validado con datos de campo. Por lo tanto, es necesario realizar las pruebas correspondientes para validar el modelo del método combinado PV-BNI, porque comparar los resultados del modelo con una aplicación real es la mejor manera para sustentar y comprobar la eficiencia de un modelo.

Recomendaciones

Con base en los modelos exhibidos en esta tesis se presentan las siguientes recomendaciones:

- 1) Para futuras mejoras a los modelos que utilizan datos del pistón inteligente, tomar en cuenta el resbalamiento del líquido.
- 2) El pistón inteligente permite calcular la velocidad de la carrera descendente. En ocasiones, la velocidad calculada a partir de datos del pistón inteligente difiere de la velocidad nominal calculada por el fabricante, en cuyo caso se recomienda descartar la velocidad nominal y utilizar la información de campo para los cálculos.
- 3) Tener claro el propósito principal del método para analizar distintos escenarios de producción, ya que se ha demostrado que maximizar la producción de líquidos, maximizar la producción de gas y maximizar el número de ciclos diarios no son resultados que necesariamente van de la mano.
- 4) Incluir elementos más reales para mejorar el desempeño de los modelos, como: la acumulación de líquido durante todas las etapas del ciclo; el aporte de líquido por parte del yacimiento; la producción de aceite; el flujo del pozo al yacimiento; el resbalamiento de líquido; y el resbalamiento de gas.
- 5) Todos los modelos hacen consideraciones que evitan un modelado 100% confiable. Inclusive los modelos más recientes necesitan mejorar e incorporar componentes más reales sin embargo, deben seguir siendo accesibles, fácilmente programables y amigables con el operador. Además, deben evitar incluir parámetros difíciles de obtener ya que esto dificulta su uso.

Referencias

1. TANG, Y. y LIANG, Z. *A New Method of Plunger Lift Dynamic Analysis and Optimal Design for Gas Well Deliquification*. SPE 116764, 2008.
2. BELLO, O.; FALCONE, G.; XU, J. y SCOTT, S. *Performance Evaluation of a Plunger Assisted Intermittent Gas Lift System*. SPE 141251, 2011.

BIBLIOGRAFÍA



BIBLIOGRAFÍA

BELLO, O.; FALCONE, G.; XU, J. y SCOTT, S. *Performance Evaluation of a Plunger Assisted Intermittent Gas Lift System*. SPE 141251, 2011.

BELLO, O.; FALCONE, G.; XU, J.; SCOTT, S. y HARROD, J. *Evaluation of Liquid Loading in the Pinedale Field: Integration of Smart Plunger Data and Mechanistic Modeling*. SPE 141250, 2011.

BROWN, K. E. *The technology of artificial lift methods*, Volumen 2a. 1980.

BROWN, K. E. *The technology of artificial lift methods*, Volumen 2b. 1980.

BROWN, K. E. *The technology of artificial lift methods*, Volumen 4. 1983.

Casing S.A. (DE, 9 de abril, 2012: <http://www.casing.com.ar>).

CHACÍN, J.; SCHMIDT, Z. y DOTY, D. *Modeling and Optimization of Plunger Lift Assisted Intermittent Gas Lift Installations*. SPE 23683, 1994.

CHAVA, G. K.; FALCONE, G. y TEODORIU, C. *Development of a New Plunger-Lift Model Using Smart Plunger Data*. SPE 115934, 2008.

CHAVA, G. K.; FALCONE, G. y TEODORIU, C. *Plunger Lift Modeling Towards Efficient Liquid Unloading in Gas Wells*. SPE 124515, 2009.

CLEGG, J. D.; HEIN, N. W. y BUCARAM, S. M. *Author's Reply to Discussion of Recommendations and Comparisons for Selecting Artificial-Lift Methods*. SPE 29092, 1994.

CLEGG, J. D.; HEIN, N. W. y BUCARAM, S. M. *Recommendations and Comparisons for Selecting Artificial-Lift Methods*. SPE 24834, 1993.

COSKUNER, G. y BOGDAN, T. *Production Optimization of Liquid Loading Gas Condensate Wells: A Case Study*. Petroleum Society of Canada 2002-107, 2002.

FOSS, D. L. y GAUL, R. B. *Plunger – Lift Performance Criteria With Operating Experience – Ventura Avenue Field*. Drilling and Production Practices, API, 1965.

GASBARRI, S. *Development of a Plunger Lift Model for Gas Wells*, tesis de maestría. Oklahoma, Universidad de Oklahoma, 1996.

GASBARRI, S. y WIGGINS, M. L. *A Dynamic Plunger Lift Model for Gas Wells*. SPE 37422, 1997.

- GAYÓN, J.; GONZÁLEZ, A. y VARGAS, P. *Uso de imágenes de videos digitales para estimar el hold-up de líquido en tuberías verticales y reconocer los patrones de flujo*. Miniproyecto de Ingeniería Química, [s.a.].
- HACKSMA, J. D. *Users Guide to Predicting Plunger Lift Performance*. The Southwestern Petroleum Short Course, Lubbock, 1972.
- KRAVITS, M.; FREAR, R. y BORDWELL, D. *Analysis of Plunger Lift Applications in the Marcellus Shale*. SPE 147225, 2011.
- LEA, J. F. *Dynamic Analysis of Plunger Lift Operations*. Journal of Petroleum Technology 2616-2629, 1982.
- LUCERO ARANDA, F. J. *Análisis Dinámico del Pistón Viajero*, tesis de licenciatura. México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 1985.
- LUCERO ARANDA, F. J. *Manejo de pozos de gas*, Apuntes de Sistemas Artificiales de Producción, Tema VII. 2011.
- MARCANO, L. y CHACÍN, J. *Mechanistic Design of Conventional Plunger-Lift Installation*. Intevep S.A., SPE Advanced Technology Series, Vol. 2, No. 1, SPE 23682, 1992.
- MORROW, S. y HEARN, W. *Plunger-Lift Advancements, Including Velocity and Pressure Analysis*. SPE 108104, 2007.
- MORROW, S.; HEARN, W. y CISNEROS, R. *New Techniques for Plunger Lift in Conventional and Nonconventional Gas*. SPE 104556, 2006.
- MOWER, L. W.; LEA, J. F.; BEAUREGARD, E. y FERGUSON, P. L. *Defining the Characteristics and Performance of Gas Lift Plungers*. SPE 14344, 1985.
- Multi Products Company, Inc. *Operating instructions for TIMAX E-Z Single valve controller*. (DE, 13 de marzo, 2012: www.plungerlift.com).
- NARVAEZ, C. y FERRER, A. *Prevention of Paraffin Well Plugging by Plunger-Lift Use*. SPE 21640, 1991.
- O'DONOGHUE, D. J. *Discussion of Recommendations and Comparisons for Selecting Artificial-Lift Methods*. SPE 28645, 1994.
- OYEWOLE, P. O. y GARG, D. *Plunger Lift Application and Optimization in the San Juan North Basin-Our Journey*. SPE 106761, 2007.
- SASK, D.; KOLA, D. y TUFTIN, T. *Plunger Lift Optimization in Horizontal Gas Wells: Case Studies and Challenges*. CSUG/SPE 137860, 2010.

SCHMIDT, Z.; DOTY, D. R.; LUKONG, P.; FERNANDEZ, O. F. y BRILL, J. P. *Hydrodynamic Model For intermittent Gas Lifting of Viscous Oil*. Journal of Petroleum Technology 475-485, 1982.

SCHMITZ, R. y STEELE, G. *Combining Plunger Lift and Compression to Lift Liquids in Low Rate Gas Wells*. Petroleum Society of Canada 2006-159, 2006.

TANG, Y. y LIANG, Z. *A New Method of Plunger Lift Dynamic Analysis and Optimal Design for Gas Well Deliquification*. SPE 116764, 2008.

WHITE, G. M. *Combining the Technologies of Plunger Lift and Intermittent Gas Lift*. Presented at the Annual American Institute Pacific Coast Joint-Chapter Meeting Costa Mesa, 1981.

APÉNDICE



Datos requeridos para utilizar los modelos.

Variable	Simbología	Modelo dinámico	Modelo dinámico con PI	Modelo mecanicista con PI	Modelo analítico con TF
Altura del líquido en la TF	$h_{L,TF}$				✓
Altura del pistón	h_P		✓	✓	✓
Coefficiente de producción de agua	C_w	✓			
Coefficiente de producción de gas	C_g	✓	✓	✓	
Densidad del agua	ρ_w		✓	✓	✓
Densidad del líquido	ρ_L	✓	✓	✓	
Densidad específica del gas	γ_g	✓	✓	✓	✓
Densidad específica del líquido	γ_L				✓
Diámetro del pistón	d_P				✓
Diámetro externo de la TF	D_{TF}				✓
Diámetro externo de la TP	D_t	✓	✓	✓	✓
Diámetro interno de la TF	d_{TF}				✓
Diámetro interno de la TP	d_t	✓	✓	✓	✓
Diámetro interno de la TR	d_c	✓	✓	✓	✓
Exponente de la ecuación de contrapresión	n_g	✓	✓	✓	
Gasto de inyección de gas	$q_{g,iny}$				✓
Líquido producido	x		✓	✓	
Longitud de la TF	h_{TF}				✓
Longitud de la TP	h_{TP}	✓	✓	✓	✓
Masa del pistón	m_P	✓			
Peso del pistón	W_P				✓
Presión de fondo fluyendo	P_{wf}		✓	✓	
Presión de inyección de gas	$P_{g,iny}$				✓
Presión de la línea de descarga	P_L	✓			✓
Presión del yacimiento	P_r	✓	✓	✓	

Variable	Simbología	Modelo dinámico	Modelo dinámico con PI	Modelo mecanicista con PI	Modelo analítico con TF
Presión en el fondo de la forma de U	$P_{wf,bU}$				✓
Presión en la TP	P_t		✓	✓	
Presión en la TR	P_c		✓	✓	✓
Presión máxima en la TP	$P_{t,max}$	✓			
Presión máxima en la TR	$P_{c,max}$	✓			
Presiones medidas por el pistón	P_{bp}		✓	✓	
Presión mínima en la TP	$P_{t,min}$	✓			
Presión mínima en la TR	$P_{c,min}$	✓			
Profundidad de asentamiento del ampacador	Lempacador			✓	
Relación gas-líquido	RGL	✓			✓
Rugosidad efectiva de la tubería	k				✓
Temperatura en el fondo	T_{wf}	✓	✓	✓	✓
Temperatura en la cabeza	T_{wh}	✓	✓	✓	✓
Temperatura medida por el pistón	T_{bp}		✓	✓	
Tensión superficial	σ				✓
Tiempo de apertura para alcanzar la presión mínima	t_{op}	✓			
Tiempo de cierre para alcanzar la presión máxima	t_c	✓			
Velocidad descendente del pistón en gas	V_{PFG}				✓
Velocidad descendente del pistón en líquido	V_{PFL}				✓