



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA EN EXPLORACIÓN Y EXPLOTACIÓN DE RECURSOS
NATURALES– PRODUCCIÓN

MODELO HIDRODINÁMICO TRANSITORIO DEL SISTEMA
ÉMBOLO VIAJERO

T E S I S
PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
RICARDO CANTILLO NEGRETE

TUTOR
DR. TEODORO IVÁN GUERRERO SARABIA
FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., JUNIO 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Contenido	i
Lista de tablas	iv
Lista de figuras	iv
Nomenclatura	vii
Resumen	ix
Introducción	1
Objetivo General	4
Objetivos específicos	4
Contenido de la tesis	5
Capítulo 2	7
Sistema del émbolo viajero	7
2.1 Fundamentos	7
2.2 Principio de operación	11
2.3 Aplicaciones	18
2.4 Selección de pozos	19
2.5 Ventajas y desventajas	20
Capítulo 3	22
Revisión de los métodos de diseño	22
3.1 Métodos empíricos de diseño	22
3.2 Modelos hidrodinámicos	25
Capítulo 4	29
Desarrollo del modelo hidrodinámico del émbolo viajero	29
4.1 Aspectos generales	29
4.2 Presurización del espacio anular	32

4.3 Carrera ascendente	34
4.4 Purga de gas	42
4.5 Carrera descendente	43
Capítulo 5	45
Programa de cómputo	45
5.1 Descripción del programa	45
5.2 Estructura de programa	46
5.2.1 Módulo 1: “Menú”	46
5.2.2 Módulo 2: “Lectura de datos”	47
5.2.3 Módulo 3: “Unidades”	48
5.2.4 Módulo 4: “Constantes”	48
5.2.5 Módulo 5: “Datos iniciales”	49
5.2.6 Módulo 6: “Presurización del sistema”	50
5.2.7 Módulo 7: “Carrera ascendente”	50
5.2.8 Módulo 8: “Producción del bache de líquido”	51
5.2.9 Módulo 9: “Producción de gas”	52
5.2.10 Módulo 10: “Carrera descendente”	53
5.2.11 Módulo 11: “Impresión de resultados”	54
Capítulo 6	56
Estudio de campo	56
6.1 Descripción del yacimiento	56
6.2 Características y condiciones de operación del pozo analizado	58
6.2.1 Antecedentes	58
6.2.2 Condiciones actuales de operación	63
	67

Capítulo 7

Validación y discusión de resultados	67
7.1 Modelo de simulación	67
7.2 Resultados	70
7.2.1 Condiciones de arranque	70
7.2.2 Comportamiento de presión en la cabeza	71
7.2.3 Velocidad y posición	73
7.2.4 Comportamiento de la presión en el fondo del pozo	75
7.2.5 Aporte de gas del yacimiento	75
7.2.6 Producción de gas en la superficie	76
7.2.7 Producción del bache	77
7.3 Validación	79
7.3.1 Comparación de resultados con datos medidos	79
7.3.2 Evaluación estadística	82
Conclusiones y recomendaciones	85
Conclusiones	85
Recomendaciones	87
Referencias	88
Anexo I	91
Carga de líquidos	91
Anexo II	93
Equipo superficial	93
Equipo subsuperficial	96

Lista de tablas

Tabla 7.1 Datos de entrada	68
Tabla 7.2 Exponente y coeficiente de flujo	69
Tabla 7.3 Condiciones iniciales	69
Tabla 7.4 Condiciones de frontera	70
Tabla 7.5 Media y desviación estándar dato medido vs predicción.....	83

Lista de figuras

Figura 2.1 Versiones del émbolo viajero	8
Figura 2.2 Elementos principales del sistema émbolo viajero	9
Figura 2.3 Ciclos de operación del émbolo viajero	11
Figura 2.4 Gas descendiendo por el espacio anular	12
Figura 2.5 Gas ascendiendo	13
Figura 2.6 Bache completo en la tubería de producción	14
Figura 2.7 Producción del bache	15
Figura 2.8 Purga de gas	16
Figura 2.9 Carrera descendente.....	17
Figura 2.10 Incremento de presión del sistema.....	18
Figura 4.1 Elementos típicos de un sistema de émbolo viajero.....	30
Figura 4.2 Presurización del sistema	32
Figura 4.3 Carrera ascendente.....	35
Figura 4.4 Ingreso del gas de BN en la TP	36
Figura 4.5 Balance de fuerzas sobre el émbolo y el bache de líquido en la tubería de producción.....	38
Figura 4.6 Movimiento del bache líquido y émbolo en la TP	40
Figura 4.7 Producción del bache.....	41
Figura 4.8 Purga de gas	42

Figura 5.1 Interfaz del programa	46
Figura 5.2 Módulo 1: “Menú”	47
Figura 5.3 Módulo 2: “Lectura de datos”	47
Figura 5.4 Módulo 3: “Unidades”	48
Figura 5.5 Módulo 4: “Constantes”	49
Figura 5.6 Módulo 5: “Datos iniciales”	49
Figura 5.7 Módulo 6: “Presurización del sistema”	50
Figura 5.8 Módulo 7: “Carrera ascendente”	51
Figura 5.9 Módulo 8: “Producción del bache de líquido”	52
Figura 5.10 Módulo 9: “Producción de gas”	53
Figura 5.11 Módulo 10: “Carrera descendente”	54
Figura 5.13 Módulo 11: “Impresión de resultados”	55
Figura 6.1 Comportamiento de producción del pozo “A”	59
Figura 6.2 Estado mecánico	60
Figura 6.3 Registro de presión de fondo	60
Figura 6.4 Gradiente de presión en el pozo “A”	61
Figura 6.5 Nivel detectado en el registro ecómetro	62
Figura 6.6 Producción de gas y líquido del pozo “A”	62
Figura 6.7 Comportamiento de presiones en cabeza y bajante del pozo “A”	63
Figura 6.8 Número de ciclos en 24 horas	64
Figura 6.9 Tiempo de duración de un ciclo y producción de bache	65
Figura 6.10 Duración del ciclo de operación del émbolo viajero	66
Figura 7.1 Curva de comportamiento de afluencia	69
Figura 7.2 Predicción del arranque del pozo “A”	71
Figura 7.3 Predicción del comportamiento de presión en cabeza	72
Figura 7.4 Simetría entre los ciclos simulados	72
Figura 7.5 Perfil de velocidad de ascenso del émbolo y bache de líquido	73
Figura 7.6 Comportamiento de velocidad y posición del émbolo viajero	74
Figura 7.7 Comportamiento de la presión debajo del émbolo	75

Figura 7.8 Aportación de gas del yacimiento.....	76
Figura 7.9 Producción de gas en superficie	77
Figura 7.10 Efecto de la producción del bache de líquido	78
Figura 7.11 Predicción de la producción del bache de líquidos.....	78
Figura 7.12 Relación entre presión en la línea o bajante y presión en cabeza	80
Figura 7.13 Comparativa de ciclo del émbolo viajero	81
Figura 7.14 Predicción en intervalos de tiempo de 300 segundos	82

Nomenclatura

A_{TP}	Área de la tubería de producción
A_{TR}	Área de la tubería de revestimiento
g	Constante de gravedad
K	Constante del estrangulador
R	Constante universal de los gases ideales
ρ	Densidad
ρ_g	Densidad del gas
ρ_L	Densidad del líquido
D	Diámetro de la tubería de producción
Z	Factor de compresibilidad del gas
f_b	Factor de fricción.
F_Z	Fuerzas que actúan dentro de la tubería de producción
q_L	Gasto de líquido
\dot{m}_e	Gasto másico del gas que ingresa del espacio anular
\dot{m}_s	Gasto másico del gas que ingresa a la tubería de producción
\dot{m}_{gsale}	Gasto másico del gas que ingresa a la línea de producción
\dot{m}_F	Gasto másico del gas liberado por el aceite o proveniente del yacimiento
q_{OMAX}	Gasto máximo de aceite
L_B	Longitud del bache de líquidos
L_E	Longitud del émbolo
L_{SB}	Longitud sobre el bache
m	Masa
M	Peso molecular
w_E	Peso del émbolo
Lb_E	Posición del émbolo
P	Presión
P_{WF}	Presión de fondo fluyendo
P_R	Presión de yacimiento

P_{BE}	Presión debajo del émbolo
P_{TP}	Presión en cabeza del pozo
P_a	Presión en espacio anular
P_L	Presión en la línea de producción
P_F	Presión en la tubería de producción debajo del embolo
P_{WS}	Presión estática
P_{SB}	Presión sobre el bache de líquido
L_t	Profundidad del punto de inyección
τ_B	Tau del bache de líquido
T	Temperatura
T_{prom}	Temperatura promedio
n	Valor de la pendiente (ecuación de Rawlins and Schellhardt)
π	Valor de PI
V_Z	Velocidad de ascenso del émbolo
V_{Fg}	Velocidad de caída del émbolo en gas
V_{Foil}	Velocidad de caída del émbolo en líquido
V_L	Velocidad en la línea de producción
V_{TP}	Volumen en la tubería de producción
V_{TR}	Volumen en la tubería de revestimiento

Resumen

Una problemática común en los pozos productores de gas en campo maduros que puede afectar su productividad de manera severa, es la acumulación de líquido (aceite y/o agua) en el fondo. Por lo tanto, en la industria se han desarrollado diferentes tecnologías para resolverla, entre las que destacan los sistemas de émbolo viajero, los cuales permiten desalojar los líquidos acumulados mediante el desplazamiento de un pistón desde el fondo hasta la superficie.

Ahora bien, el diseño de los sistemas de émbolo viajero tradicionalmente se realiza con base en correlaciones empíricas, o con modelos hidrodinámicos simplificados en régimen permanente; en general, ambos enfoques presentan limitaciones importantes, pues no consideran las variaciones temporales de los parámetros principales del flujo, los cuales son inherentes a la operación de este sistema artificial de levantamiento.

Por otra parte, aunque existen diversos métodos de diseño en la literatura, no se encuentran implementados en herramientas de cómputo de uso comercial en la industria petrolera mexicana.

Con base en lo anterior, es claro que se requiere un modelo matemático que describa los aspectos principales hidrodinámicos del flujo transitorio, durante la operación de los sistemas de émbolo viajero, así como una herramienta computacional para su diseño y evaluación basada en el modelo desarrollado. Tales puntos constituyen la motivación del presente trabajo.

Este documento comienza con una revisión de los principios de operación de los sistemas de émbolo viajero, sus aplicaciones, la selección de pozos, y sus ventajas y desventajas. Posteriormente, se presenta un resumen de los aportes principales con relación a los métodos de diseño existentes actualmente.

Se presenta el desarrollo de un modelo hidrodinámico de flujo transitorio para la operación de los sistemas de émbolo viajero. En el planteamiento se considera que el ciclo de operación está conformado por cuatro etapas, en cada una de las cuales se plantean y resuelven las ecuaciones de conservación de materia y cantidad de movimiento en volúmenes de control característicos. Los sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias resultantes, se resuelven numéricamente mediante el método de Runge-Kutta de cuarto orden. El modelo se implementó en un programa de cómputo en Excel VBA, para ordenadores personales con Microsoft Office.

El modelo y los resultados de la herramienta computacional desarrollados, se validaron con base en datos de campo correspondientes a un estudio de caso de un pozo productor de gas húmedo, que presenta acumulación de agua, en un campo de México.

El modelo y programa propuestos se presentan como una alternativa para evaluar la operación de los sistemas de émbolo viajero en pozos de gas, y sirve como una primera aproximación para explorar distintas aplicaciones del sistema en la industria petrolera.

Capítulo 1

Introducción

Los campos petroleros se denominan “maduros” cuando han alcanzado el pico máximo de su producción y han iniciado su etapa de declinación. Alrededor del 50% de la producción mundial de hidrocarburos proviene de yacimientos en estas condiciones. En México, el 70% de la producción corresponde a campos maduros, la mayoría con más de 30 años de explotación.

La declinación de la producción de petróleo y gas es un proceso natural e inevitable que afecta a todos los yacimientos petroleros: yacimientos de gas y yacimientos de aceite. Una de las causas que da origen a esta problemática es que la energía del yacimiento ya no es suficiente para levantar los fluidos de la formación hasta las instalaciones superficiales.

Bajo esta condición es necesario aportar energía al sistema para que la producción continúe. El aporte de energía puede ser a nivel de yacimiento o de pozo. En el primer caso, pueden implementarse procesos de mantenimiento de presión o técnicas de recuperación mejorada. Por otra parte, a nivel de pozo pueden utilizarse Sistemas Artificiales de Producción (SAP), tales como: bombeo neumático, bombeo electrocentrífugo, bombeo mecánico, bombeo hidráulico, bombeo de cavidades progresivas y el sistema de émbolo viajero. La selección y aplicación de cada uno de estos depende principalmente de las características del fluido a producir, estado mecánico del pozo, etapa de explotación del campo y ubicación (en tierra o costa afuera).

En la actualidad una de las principales preocupaciones de Petróleos Mexicanos es garantizar el abastecimiento de gas combustible para uso doméstico e industrial. En noviembre de 2017 México compró a Estados Unidos un volumen de gas LP de 60,000 barriles diarios para garantizar la demanda.

Desde principios del año 2000 ha sido constante la necesidad de importar un mayor volumen de gas para satisfacer la demanda interna. Tan solo de 2010 a 2018 el consumo de gas creció en promedio 50%, en tanto la producción de gas natural disminuyó 1,900 MMpcd, lo que se ha reflejado en una tendencia creciente a aumentar las importaciones.

La importancia del gas natural en México ha impulsado los esfuerzos de Petróleos Mexicanos para incrementar su factor de recuperación. En la actualidad, los retos tecnológicos que se enfrentan están enfocados en tres rubros principales:

1. Maximizar la producción de gas en campos existentes.
2. Explotación de yacimientos no convencionales, principalmente de gas en lutitas (shale gas).
3. Aprovechamiento de gas amargo con alto contenido de nitrógeno.

En términos generales el aprovechamiento de gas húmedo amargo con alto contenido de nitrógeno, es un proyecto ambicioso a mediano plazo. Consiste en instalar la infraestructura necesaria para procesar el gas con alto porcentaje de nitrógeno para comercializarlo en lugar de reinyectarlo al yacimiento. Con este proyecto se pretende incrementar la producción de gas natural en 300 MMpcd.

En años recientes, la explotación de yacimientos de gas en lutitas representa un área de oportunidad para la industria nacional del gas natural. Sin embargo, las características geológicas y petrofísicas inherentes a este tipo de yacimientos hacen difícil su producción en cantidades comerciales. Para tal efecto, se requiere la aplicación de técnicas y tecnologías especiales para aumentar la permeabilidad del medio y comunicar los poros que almacenan el gas.

Tanto en yacimientos de gas convencionales como no convencionales persiste la problemática de acumulación de líquidos en el fondo del pozo, ya sea por la irrupción temprana de agua o por la declinación natural del yacimiento. Este fenómeno caracteriza por la acumulación progresiva de líquidos en el fondo del pozo. Originando un aumento en la presión de fondo fluyendo hasta impedir parcial o totalmente la producción del pozo.

En este trabajo se investigará la aplicación del sistema de émbolo viajero como una alternativa para desalojar el líquido acumulado en el fondo del pozo, mejorando su productividad. En este sistema de levantamiento artificial, el émbolo viajero crea una interfase sólida entre el gas y líquido, la cual viaja verticalmente de manera cíclica, ascendente y descendente, elevando los líquidos acumulados en el fondo del pozo hasta la superficie. En su versión asistida con gas de bombeo neumático (BN), se inyecta gas para reducir la duración de los ciclos.

En sentido estricto, el diseño y análisis de la operación del sistema émbolo viajero requiere el uso de simulación dinámica. Debido a que no se han identificado herramientas ni modelos de código abierto que permitan hacerlo, en el presente trabajo se desarrollará un modelo matemático transitorio que capture los mecanismos hidrodinámicos principales durante la operación del sistema de émbolo viajero (en sus versiones autónoma y asistida con gas de BN), y el cual se implementará en una herramienta computacional.

Objetivo General

Desarrollar un modelo matemático transitorio que capture los mecanismos hidrodinámicos principales durante la operación del sistema de émbolo viajero (en sus versiones autónoma y asistida con gas de bombeo neumático) en pozos de gas con acumulación de líquido en el fondo, e implementarlo en una herramienta computacional, que permita investigar la aplicación de este sistema artificial en un estudio de caso para un pozo productor de gas en un yacimiento en México.

Objetivos específicos

1. Revisión de la literatura relacionada con el diseño y operación de los sistemas de émbolo viajero.
2. Generar un modelo matemático que capture los mecanismos hidrodinámicos principales durante la operación del sistema de émbolo viajero autónomo y asistido con bombeo neumático. El modelo se formulará y validado para un sistema productor de gas con irrupción de agua.
3. Desarrollar una herramienta computacional a partir del modelo matemático propuesto, para diseñar y analizar la operación de los sistemas de émbolo viajero.
4. Validar y verificar los resultados del programa de cómputo con información disponible de un pozo productor de gas de un yacimiento en México.

Contenido de la tesis

En el capítulo 2 se describen las características que dieron origen a la conceptualización del sistema émbolo viajero como parte de las técnicas disponibles para la remoción de líquidos (condensados y/o agua) en pozos productores de gas. Se describe el principio de operación de este sistema de levantamiento artificial, su configuración mecánica, sus ventajas y desventajas, así como los criterios de selección de los pozos.

El capítulo 3 describe algunos de los modelos matemáticos existentes para el diseño y operación de los sistemas de émbolo viajero. En primer lugar, se presentan los métodos empíricos planteados a partir de datos de campo. Posteriormente, se describen algunos modelos matemáticos basados en aspectos hidrodinámicos.

En el capítulo 4 se presenta el desarrollo del modelo matemático propuesto para describir la operación del sistema de émbolo viajero. Para tal efecto, se considera que el ciclo de operación está conformado por cuatro etapas. En cada una de ellas, se plantean las ecuaciones de conservación de materia y cantidad de movimiento en los volúmenes de control característicos.

El capítulo 5 describe el programa de cómputo desarrollado para estudiar la hidrodinámica de los sistemas de émbolo viajero. El programa está basado en el modelo descrito en el capítulo 4, y permite calcular la posición y velocidad de ascenso del émbolo, los requerimientos de presión en el espacio anular, el comportamiento de la presión en la tubería de producción, el tamaño del bache y la duración del ciclo de operación.

En el capítulo 6 se presenta las características, antecedentes y condiciones de operación típicas del pozo que será utilizado en la validación del modelo hidrodinámico desarrollado en el trabajo presente. El pozo se encuentra localizado en un campo productor de gas húmedo en México, y opera con un sistema de émbolo viajero debido a que presenta acumulación de líquido en el fondo.

En el capítulo 7 se describe el modelo de simulación utilizado en la herramienta computacional desarrollada, y se discuten los resultados de las simulaciones realizadas. Finalmente, se presenta la evaluación estadística del modelo.

Capítulo 2

Sistema del émbolo viajero

En este capítulo se describen las características que dieron origen a la conceptualización del sistema émbolo viajero, como parte de las técnicas disponibles para la remoción de líquidos (condensados y/o agua), en pozos productores de gas. Se describe el principio de operación de este sistema de levantamiento artificial, su configuración mecánica, sus ventajas y desventajas, así como los criterios de selección de los pozos.

2.1 Fundamentos

El sistema de émbolo viajero (“Plunger Lift”, en inglés) fue diseñado e implementado inicialmente en los Estados Unidos para la explotación de pozos de gas y condensado. Esta aplicación se ha evaluado por muchos años en pozos de gas con problemas de producción de líquidos, con mayor presencia en campos de arenas y lutita con profundidades de producción que varían de 4,000 a 14,000 pies (Foss y Gaul 1965). En pozos de aceite se ha utilizado principalmente cuando se presenta un patrón de flujo anular (el gas fluye en el centro y el líquido en las paredes de la tubería (Foss y Gaul 1965). En México, su aplicación se ha concentrado en mitigar los problemas de acumulación de líquidos en el fondo de pozos de gas. En el anexo I se describen las causas que originan este fenómeno.

El émbolo viajero o pistón viajero, consiste en una interfase mecánica entre los líquidos del pozo y el gas producido. El mecanismo principal de producción asociado a este tipo de levantamiento es la expansión del gas acumulado en el espacio anular

(EA). Los líquidos se levantan hasta la superficie mediante el movimiento ascendente de un pistón o émbolo que va desde el fondo hasta la superficie. Esta interfase elimina o reduce el resbalamiento de líquido en las paredes de la tubería, incrementando la eficiencia del gas para levantar los líquidos del fondo.

Comúnmente este método de levantamiento se clasifica como un sistema artificial de producción (SAP), sin embargo, no es así, debido a que el émbolo viajero por sí mismo no suministra energía adicional a los fluidos producidos por el yacimiento. Ahora bien, se tiene la flexibilidad de combinarlo con el bombeo neumático (BN), en lo que se conoce como versión asistida del émbolo viajero. En este caso, sí podría considerarse como un SAP dada la inyección de gas a presión (Clegg 1994).

La **Figura 2.1** muestra las versiones disponibles del émbolo viajero. En su versión autónoma, este dispositivo aprovecha la energía propia del yacimiento a través del gas que produce la formación. En su versión asistida, el aporte de energía se realiza mediante la inyección de gas a presión por el espacio anular.



Figura 2.1 Versiones de émbolo viajero

En la **Figura 2.2** se indican los principales elementos que componen los equipos superficial y sub-superficial de un sistema típico de émbolo viajero; a continuación se describe cada uno de ellos.

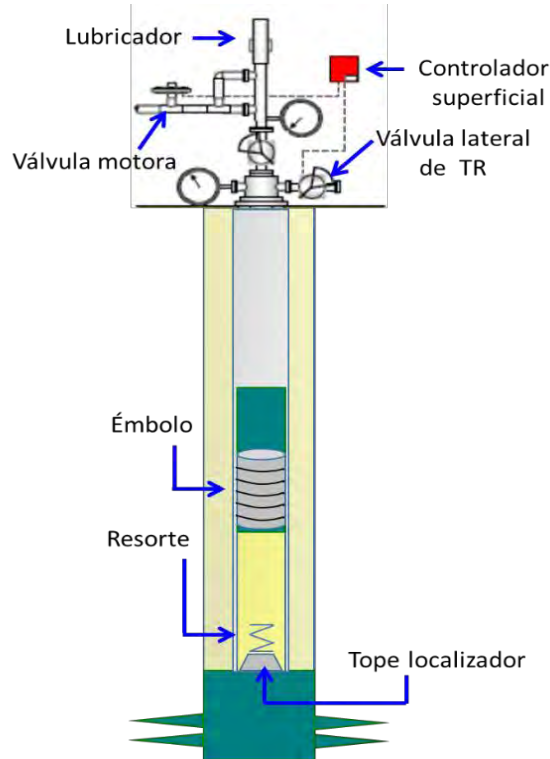


Figura 2.2 Elementos principales del sistema émbolo viajero

- **Controlador superficial:** Es un equipo electrónico cuya función es controlar la apertura y cierre de la válvula motora en función de presión, tiempo, o la combinación de ambos. Puede responder a señales de sensores de nivel de líquido y arribo del émbolo a la superficie.
- **Válvula motora:** Dispositivo mecánico colocado en la tubería de descarga del pozo. Diseñada con el fin de regular, permitir o impedir el flujo entre la tubería de producción y la línea de descarga.
- **Válvula lateral de TR:** Componente instalado en la línea de inyección gas de bombeo neumático para controlar la entrada de gas. Este dispositivo se emplea principalmente en la versión asistida.

- **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. En un costado tiene un dispositivo de detección que genera una señal cuando recibe al émbolo, que permite retenerlo en superficie en caso de que se necesite.
- **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.
- **Émbolo:** Dispositivo, generalmente metálico, cuya función principal es crear una interfase mecánica entre el bache de líquido que desea producirse y el gas impulsor.
- **Tope localizador:** Dispositivo instalado en el interior de tubería de producción cuyo objetivo es alojar el resorte y el émbolo a una la profundidad deseada.

Dependiendo de las características de cada pozo, pueden implementarse otros elementos en el diseño del sistema. Detalles adicionales relacionados con la descripción y funcionamiento de cada dispositivo pueden consultarse en el anexo II.

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

En el diseño y la operación del sistema émbolo viajero en su versión autónoma, se considera que el pozo no tiene un empacador instalado entre la tubería de producción (TP) y la tubería de revestimiento (TR). Ésta situación no representa una limitante en la versión asistida con gas de inyección; no obstante, la operación exitosa del sistema dependerá de la profundidad del punto de inyección. En ambas modalidades, el espacio anular actúa como un reservorio para la acumulación de gas del yacimiento o de inyección, según sea el caso.

2.2 Principio de operación

Tanto en la versión asistida como en la convencional del sistema de émbolo viajero, en un ciclo de operación pueden diferenciarse cuatro etapas: carrera ascendente, purga de gas, carrera descendente, y presurización del sistema. (**Figura 2.3**). A continuación, se describe cada una de ellas.

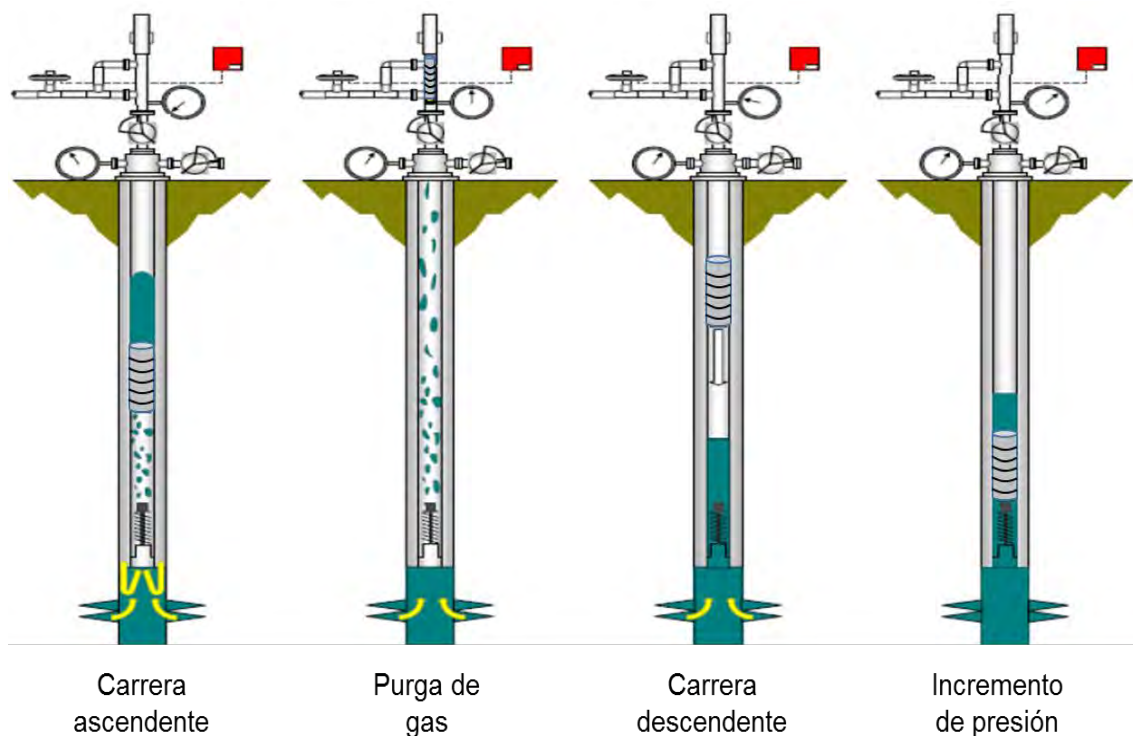


Figura 2.3 Ciclos de operación del émbolo viajero

1. Carrera ascendente

La carrera ascendente comienza en el momento que el émbolo cambia su estado de reposo (en el fondo del pozo) a movimiento hacia la superficie, mediante la apertura de la válvula motora. En este instante se crea una diferencia de presión que provoca que el gas acumulado en el espacio anular comience a expandirse, empujando al émbolo y al bache de líquido hasta la

superficie. Para analizar esta etapa, es necesario subdividirla en cuatro periodos: a) gas descendiendo por el espacio anular, b) gas ascendiendo, c) bache completo en la tubería de producción y d) producción del bache.

a. Gas descendiendo por el espacio anular

El gas a presión y una columna de líquido viajan en forma descendente en el espacio anular. Por otra parte, el émbolo y el bache de líquido comienzan a ascender en el interior de la TP, como puede observarse en la **Figura 2.4**. Esto continúa hasta que el gas alcanza el extremo inferior de la TP.

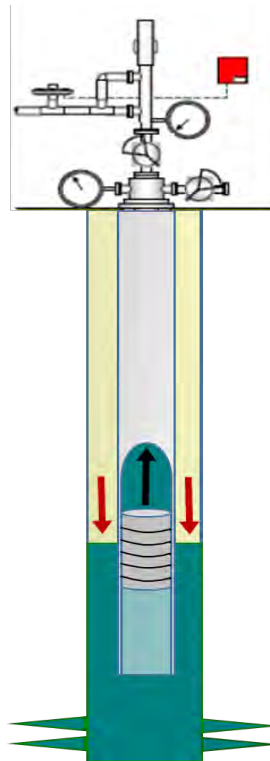


Figura 2.4 Gas descendiendo por el espacio anular

b. Gas ascendiendo

La **Figura 2.5** ilustra cómo el bache de líquido y el émbolo siguen ascendiendo, mientras que el gas que ha logrado entrar en la tubería de producción comienza a formar burbujas pequeñas. Debido a la expansión del

gas, las cuales coalescen hasta formar una burbuja que ocupa prácticamente la totalidad de la sección transversal de la tubería, referida como burbuja de Taylor característica del flujo tipo bache. El líquido por debajo del émbolo cae asociado al resbalamiento, adhiriéndose a las paredes de la tubería formando una película delgada. Durante este periodo, el yacimiento puede comenzar a aportar fluidos al pozo en el momento en que la presión de fondo fluyendo sea menor a la presión del yacimiento.

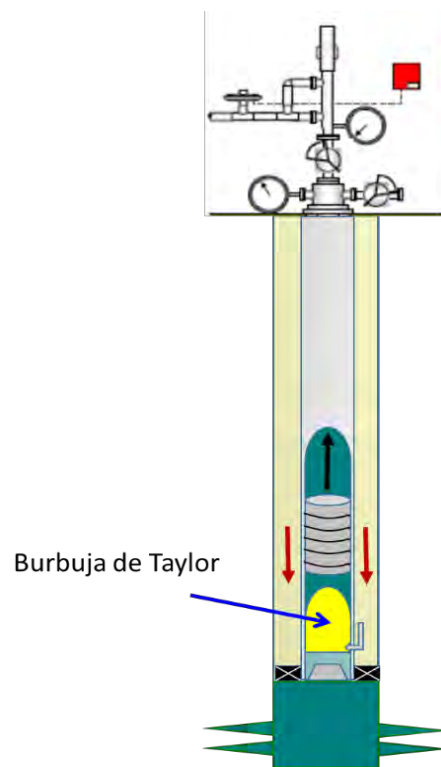


Figura 2.5 Gas ascendiendo

c. *Bache completo en la tubería de producción.*

Este periodo se ilustra en la **Figura 2.6**. Tanto el bache de líquido como el émbolo siguen ascendiendo por la TP, impulsados por el gas. El volumen de líquido que se escurre está controlado por la velocidad relativa de ascenso entre el émbolo y el bache de líquido, y por el sello que el émbolo forma con

la TP. Es posible que se presente arrastre de líquidos del fondo del pozo a la tubería de producción, por la velocidad del gas en el extremo inferior de la TP. Conceptualmente el régimen de flujo esperado detrás del émbolo es de tipo anular.

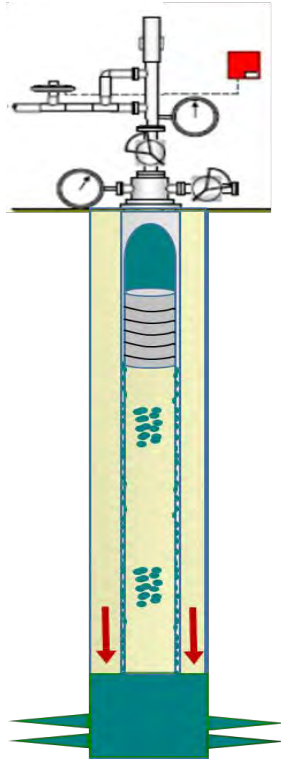


Figura 2.6 Bache completo en la tubería de producción

d. Producción del bache

En este punto, el bache de líquido llega a la superficie y comienza a pasar a la tubería de producción. Esta etapa se caracteriza porque el tamaño del bache comienza a disminuir, la resistencia al flujo se reduce, y éste se acelera súbitamente, aumentando la velocidad de ascenso del émbolo. La etapa termina cuando el bache se ha producido en su totalidad y el émbolo lo recibe el lubricador. En la **Figura 2.7** se puede ilustra este periodo.

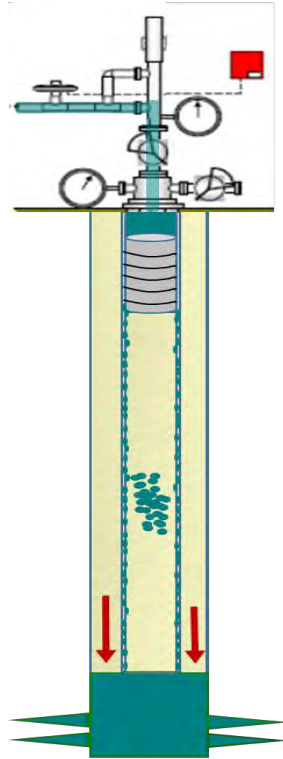


Figura 2.7 Producción del bache

2. Purga de gas

Tras haber producido el bache de líquido, si la válvula motora no se cierra y el émbolo se mantiene en la superficie, el gas fluye libremente hacia la línea de descarga. Bajo algunas circunstancias, la mayor producción de líquidos se alcanza durante esta etapa, en la que el flujo de gas acarrea una gran cantidad de líquido como se muestra en la **Figura 2.8**.

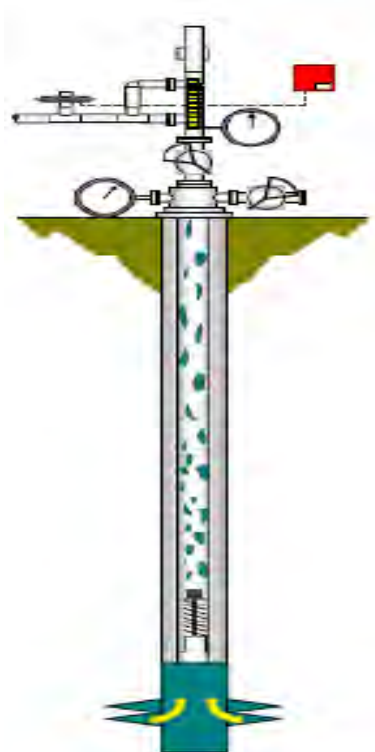


Figura 2.8 Purga de gas

3. Carrera descendente

Para muchos autores ésta es la segunda etapa del ciclo. Comienza en el instante en que se cierra la válvula motora y el émbolo (alojado en superficie) se libera, acelerándose en caída libre hasta el fondo del pozo, como se muestra en la **Figura 2.9**. Si el bache siguiente de líquido ya se ha comenzado a formar, el émbolo descenderá una parte de la carrera en seno de gas y otra en líquido, presentando dos perfiles de velocidad de descenso. El siguiente bache de líquidos está constituido por los fluidos de la formación, líquidos dejados atrás durante la carrera ascendente del émbolo y el líquido barrido en la carrera descendente.

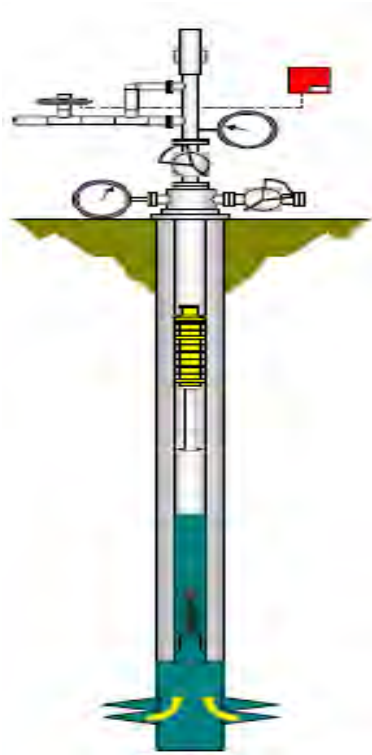


Figura 2.9 Carrera descendente

4. Incremento de presión del sistema

La cuarta etapa del ciclo comienza en el momento en que el émbolo llega al final de la tubería de producción y se asienta en el resorte de fondo, sitio en el que descansará durante esta etapa, como se muestra en la **Figura 2.10**. Los fluidos del yacimiento entran al pozo, el gas ocupa la sección superior tanto del espacio anular como de la TP, y el líquido ocupa la parte inferior.

En la versión convencional, el espacio anular comienza a presurizarse con gas del yacimiento mientras que el líquido forma una columna que sobrepasa 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 se abre la válvula motora por medio del controlador de superficie, iniciando así un nuevo ciclo. En la versión asistida de émbolo viajero el espacio anular se presuriza con la entrada de gas de

inyección y del yacimiento, reduciendo el tiempo requerido para comenzar el ciclo nuevamente.

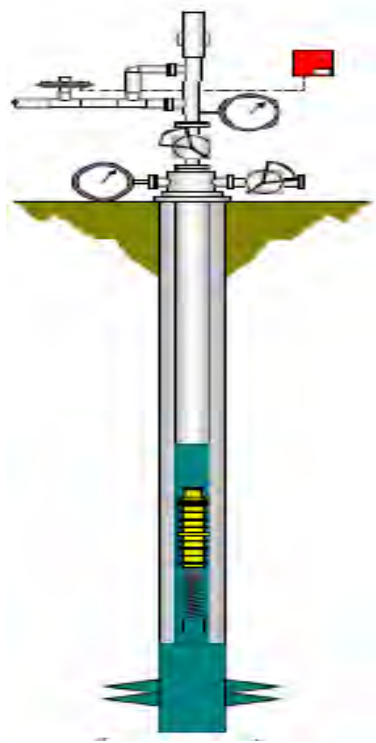


Figura 2.10 Incremento de presión del sistema

2.3 Aplicaciones

Entre las aplicaciones de campo más importantes del sistema émbolo viajero pueden mencionarse las siguientes:

- Mantener la producción de pozos de aceite con altas relaciones gas-líquido ($RGL > 900 \text{ m}^3/\text{m}^3$). Cuando la RGL se incrementa demasiado, el patrón de flujo característico es el flujo anular. En este caso, la implementación del método del émbolo viajero tiene la finalidad de maximizar la producción de líquidos (Brown 1984).

- Mejora la producción de pozos de gas con problemas de carga de líquidos. Cuando disminuye la capacidad para levantarlos hasta la superficie se acumulan en la parte inferior del pozo. Esto genera una contrapresión en el yacimiento, si no se controla a tiempo, la columna de líquidos puede generar una presión hidrostática igualando la presión del yacimiento, impidiendo el flujo del pozo.
- Reduce el resbalamiento de líquidos en pozos con bombeo neumático. En algunos casos, la instalación de BN no incrementa la producción de aceite en pozos de baja productividad; por lo tanto, una alternativa para aprovechar el gas de inyección es la combinación del émbolo viajero con bombeo neumático.
- Mantiene limpia la tubería de producción en pozos con problemas de formación de depósitos orgánicos e inorgánicos.

Además de las aplicaciones mencionadas, este método puede utilizarse en pozos que se han tratado con fluidos de inyección (estimulados) y que requieren descargarse, antes de que el pozo comience a aportar de manera natural.

2.4 Selección de pozos

En el proceso de selección de un pozo para la instalación del émbolo viajero, se debe tomar en cuenta el estado mecánico y las características del yacimiento. A este respecto, pueden mencionarse los puntos siguientes:

- En cuanto a las condiciones del pozo, éste debe tener un solo diámetro interno de la tubería de producción, el cual debe ser igual al diámetro de paso de la válvula maestra y la válvula de tormenta (en pozos costa afuera), ya que de lo contrario se impediría el libre paso del émbolo a través de todo el recorrido.

- Con relación a las características del yacimiento, éste debe tener la capacidad para aportar el volumen de gas requerido y la suficiente presión para elevar el émbolo y los fluidos hasta la superficie.
- La RGL mínima para operar el émbolo viajero es la cantidad mínima real de gas en la tubería de producción dividida por el volumen del bache de líquidos capturado, medidos a la temperatura media a la cual opera el ciclo del émbolo; sin embargo, una “regla de dedo” que aún se utiliza, menciona que serán suficientes 400 pies³/barril por cada 1,000 pies de longitud a elevar (Brown, 1984).
- Otro punto a considerar en los pozos candidatos para la aplicación del émbolo viajero, es la estabilidad de la presión en la línea de flujo. Los requerimientos volumétricos del gas para levantar cierto volumen de líquido pueden variar de manera importante en función de las fluctuaciones de la presión en los pozos vecinos.

2.5 Ventajas y desventajas

Entre las ventajas y desventajas principales de los sistemas de émbolo viajero, se pueden mencionar las siguientes.

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. No requiere suministro de energía en la versión convencional.
- Los elementos subsuperficiales se instalan y recuperan con línea de acero.

- Es un sistema flexible que puede adaptarse en un amplio rango de aplicaciones y cambios en las condiciones de flujo; solamente se requiere variar la velocidad del ciclo, las presiones o el tiempo para incrementar su eficiencia.
- Su diseño, instalación y operación son relativamente simples.
- Las instalaciones superficiales requeridas son pequeñas y no generan ruido excesivo, por lo que es considerado un sistema discreto.
- Puede aplicarse en pozos terrestres, costa afuera, verticales, desviados, horizontales, de gas y de aceite.
- Soporta altas temperaturas sin presentar un mal funcionamiento.
- Permite manejar grandes volúmenes de gas.
- Elimina la necesidad de espumas.
- Incrementa la producción en pozos con fluidos emulsionados.
- Remueve e impide la acumulación de parafinas.

Desventajas:

- Si el émbolo se pega a la pared, es difícil recuperarlo.
- 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.
- Generalmente, se limita a gastos de aceite del orden de 200 bpd a profundidades de 10,000 pies.
- Los líquidos producidos deben tener viscosidades bajas, ya que una alta viscosidad impide el buen desplazamiento del émbolo.

Capítulo 3

Revisión de los métodos de diseño

En este capítulo se describen algunos de los modelos matemáticos existentes para el diseño y operación de los sistemas de émbolo viajero. En primer lugar, se presentan los métodos empíricos planteados a partir de datos de campo. Posteriormente, se describen algunos modelos matemáticos basados en aspectos hidrodinámicos.

3.1 Métodos empíricos de diseño

En 1955, Beesson et al. presentaron un conjunto de nomogramas para el diseño de los sistemas de émbolo viajero, desarrollados a partir de correlaciones empíricas obtenidas con datos de 84 pozos productores de gas en Estados Unidos, con diámetros de tubería de $2 \frac{7}{8}$ y $2 \frac{3}{8}$ pg.

Establecieron cuatro ecuaciones que relacionan los requerimientos de gas, presión (en cabeza y espacio anular), tamaño del bache de líquido, profundidad y relación gas líquido. Los autores presentaron una solución gráfica para la operación eficiente del émbolo viajero que relaciona la carga del tamaño del bache con el gasto de producción bruta. Los datos requeridos para utilizar los nomogramas son:

profundidad, presión estática, índice de productividad y presión mínima prevista en la tubería.

Foss y Gaul (1965) desarrollaron el primer modelo del sistema émbolo viajero con base en sus experiencias en el campo Ventura Avenue, en el sur de California en los Estados Unidos. Para tal efecto, los autores utilizaron datos de 100 pozos operando con émbolo viajero, sin empacador, y con altas relaciones gas-líquido. El modelo desarrollado permite determinar los parámetros principales de diseño y operación del sistema: presión promedio en el espacio anular, presión en cabeza, tamaño del bache y requerimientos de gas en ciclos por día. Aunque el modelo les permitió reproducir razonablemente bien los resultados de campo, su aplicación fue limitada ya que no se consideraron los cambios en el comportamiento de afluencia, lo cual es crítico en la mayoría de los pozos de baja presión. Las simplificaciones principales del modelo fueron:

- Se desprecia la fricción originada por el movimiento del émbolo y el flujo de gas.
- Siempre existe una diferencia de presión entre el gas del espacio anular y los fluidos en la tubería de producción.
- No se considera la entrada de líquido debajo del émbolo durante la carrera ascendente.
- La velocidad promedio del émbolo durante la carrera ascendente es constante e igual a 1,000 pies / min (5.08 m/s). En cuanto a su velocidad durante la carrera descendente, se considera de 2,000 pies / min (10.16 m/s) en el seno de gas, y de 172 pies / min (0.87 m/s) en la columna de líquido.

En 1972, Hacksma mejoró el modelo de Foss y Gaul, al incorporar curvas de comportamiento de afluencia (IPR). Identificó como ciclo óptimo a aquél en que el gas es suficiente para levantar el bache de líquido en el momento en que el émbolo llega al fondo del pozo en la carrera descendente.

Abercrombie (1980) presentó un modelo estático basado en el trabajo de Foss y Gaul. Con base en pruebas y mediciones en 24 pozos, propuso utilizar una velocidad de descenso del émbolo en la columna de gas, de 1070 pies / min.

White (1982) presentó un modelo para aplicaciones del émbolo viajero en pozos con bombeo neumático intermitente (BNI) basado en la similitud de ambos métodos. Consideró que el escurrimiento de líquido es una función de la relación de la velocidad del bache y de la burbuja que lo impulsa. De esta manera, el resbalamiento puede disminuir al incorporar un émbolo viajero en el sistema de bombeo neumático. De acuerdo a los resultados de White, el émbolo incrementa la eficiencia del levantamiento al reducir el resbalamiento, a una cierta relación de presiones entre la tubería de revestimiento (PTR) y la tubería de producción (PT).

Adicionalmente White encontró que al realizar un agujero en el centro del émbolo a lo largo de su eje longitudinal causa una mejora adicional en la eficiencia de operación del émbolo viajero.

En 1985 Mower y Lea et al. realizaron pruebas experimentales para evaluar la eficiencia de 13 émbolos comerciales en un pozo instrumentado de 735 pies (224 m). Midieron presión, velocidad, gastos de gas y líquido en las diferentes etapas del ciclo de operación del émbolo. Como resultado, generaron un banco de datos que incluye deslizamiento de gas, resbalamiento de líquido, y velocidades de ascenso y descenso del émbolo.

Los resultados obtenidos fueron:

- Una velocidad mínima de operación durante la carrera ascendente de ~250 pies / min.
- La velocidad óptima de ascenso depende del tipo del émbolo y está cerca de 1000 pies / min.
- La relación de resbalamiento depende del tipo de émbolo, la velocidad de ascenso y el tamaño del bache. El resbalamiento se incrementa a medida que aumenta la velocidad del émbolo.

- La acumulación del líquido por resbalamiento es una función lineal de la velocidad media de ascenso del émbolo.

3.2 Modelos hidrodinámicos

En 1982, Lea publicó el primer modelo dinámico para la operación de los sistemas de émbolo viajero, argumentando que el modelo estático de Foss y Gaul sobrestima la presión necesaria para levantar el émbolo y el bache; de la misma forma, sobrestima el volumen de gas requerido en aproximadamente 16%. Lea propone que la velocidad ascendente del émbolo y del bache es variable, y que la presión en el espacio anular no permanece constante. Para desarrollar su modelo se basó en un balance de momento, tanto del bache como del émbolo. Concluyó que el resbalamiento del líquido decrece al incrementar la velocidad debido al aumento en la presión del espacio anular.

Rosina (1983) presentó un modelo hidrodinámico del émbolo viajero convencional. En este trabajo se desarrolló un modelado riguroso de la expansión del gas. Proporcionó un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias, que se pueden resolver numéricamente usando técnicas de integración estándar. Los resultados de este modelo ajustaron bien con los datos experimentales obtenidos en una instalación de prueba de acrílico de 60 pies de alto. El comportamiento del resbalamiento de líquido predicho por el modelo en función de la relación de presiones para mover el émbolo, fue similar al registrado en una instalación de bombeo neumático intermitente, ya que se supone que el frente de la burbuja y el émbolo se mueven a la misma velocidad. Los resultados aportados por Rosina se resumen, en que es posible mejorar la eficiencia del émbolo viajero de manera significativa en aplicaciones de baja presión.

En 1992, Marcano y Chacín propusieron un modelo mecanicista basado en las ecuaciones de balance de momento y conservación de la masa, el cual está constituido por ecuaciones diferenciales no lineales. En el planteamiento del modelo

consideraron un pozo productor de gas sin empacador, y manejaron tres etapas principales en el ciclo de operación: carrera ascendente, carrera descendente, y aumento de presión; adicionalmente, subdividieron la carrera ascendente en cuatro etapas: gas descendiendo por el espacio anular, gas ascendiendo por la TP, bache completo subiendo por la TP, y producción del bache. Lograron modelar adecuadamente las velocidades de ascenso del émbolo y la relación de la presión necesaria en la TR, integrando en la ecuación de comportamiento de afluencia, el efecto del gas aportado por la formación. La principal aportación de los autores radica en el modelado del resbalamiento del líquido a través del émbolo durante la carrera ascendente. Determinaron que el resbalamiento es distinto en cada etapa de la carrera ascendente.

En 1994 Chacín, Schmidt y Doty desarrollaron un modelo mecanicista con base en ecuaciones de balance de materia y conservación de momento para pozos productores de aceite con bombeo neumático intermitente (BNI). Incorporaron parámetros como la presión del yacimiento y la presión de inyección, el comportamiento de afluencia (IPR), las características de las tuberías y del émbolo, y el diseño y desempeño de las válvulas del BNI. Para modelar el ciclo, lo dividieron en cuatro etapas: carrera ascendente, producción del bache, purga de gas, e incremento de presión. En esta última etapa se incluye la carrera descendente y la regeneración del bache. Una de las simplificaciones principales de este modelo, es asumir que el líquido que se introduce en el fondo del pozo no afecta el comportamiento bifásico de la elevación de la burbuja de gas.

En 1997, Gasbarri y Wiggins presentaron un modelo dinámico que incorpora los efectos de fricción del bache de líquido y del gas en expansión por encima y por debajo del émbolo, así como el efecto de la línea de descarga y del separador. Su enfoque maneja volúmenes de control múltiples adyacentes que cubren la totalidad del sistema. Las consideraciones principales en el desarrollo del modelo son:

- Flujo monofásico de gas debajo del émbolo durante la carrera ascendente.
- No hay reinyección de fluidos al yacimiento.
- El gas no se desliza más allá del émbolo durante la carrera ascendente.

En 2008, Tang y Liang desarrollaron un nuevo modelo dinámico para describir el movimiento del émbolo. Incorporaron el efecto del estrangulador de producción y de la válvula de inyección de gas en la superficie. Consideraron el resbalamiento del líquido, el mecanismo de acumulación de líquidos y la fricción del émbolo. Este modelo aplica para pozos de gas con problemas de carga de líquidos por irrupción de agua. Además, permite simular la retención del émbolo en el lubricador por un cierto tiempo para maximizar la producción de gas. El modelo permite estimar la variación de la presión en la cabeza del pozo y de la presión en el espacio anular, a partir de datos de presiones de diseño, profundidad, tipo de émbolo y gasto deseado de líquido.

En 2008, Chava, Falcone y Teodoriu publicaron un modelo capaz de predecir el comportamiento hidrodinámico del sistema de émbolo viajero de una manera más realista, que permite optimizar los ciclos de operación. Entre las ventajas del modelo pueden mencionarse: (1) incluye flujo de dos fases dentro de la TP por debajo del émbolo durante la carrera ascendente; y (2) considera las variaciones de la presión en la cabeza del pozo. Por otra parte, sus limitaciones son: (1) el modelo está dirigido a pozos de gas con acumulación de agua; (2), el nivel de líquido en el espacio anular no cambia en ningún momento; (3) no hay resbalamiento de líquido; y (4) se requieren mediciones de presión y temperatura en tiempo real.

En 2009, los mismos autores anteriores presentaron mejoras en el modelo propuesto un año antes para predecir el tamaño del bache, la velocidad y la posición del émbolo durante la carrera ascendente. Identificaron cuatro regiones de flujo: la región 1 por encima del bache dentro de la TP y llena de gas; la región 2 comprende 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. En la nueva versión del modelo tomaron en cuenta la carga hidrostática de la columna de gas en la región 1.

En 2011, Bello, Falcone, Xu, Scott y Harrod desarrollaron un modelo mecanicista para la operación de un sistema de émbolo viajero, en que el espacio anular está aislado mediante un empacador. Los datos de entrada del modelo son: 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. Los autores determinaron que el tiempo de presurización de la TP puede reducirse con la implementación del empacador.

En el año 2011, los autores Bello, Falcone, Xu y Scott establecieron un modelo analítico para describir el comportamiento de un sistema híbrido de émbolo viajero y 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 TF y la TP, e instalar el émbolo viajero en el interior de la TF. El gas aportado por la formación se produce continuamente hacia el espacio anular entre la TR y la TP. Así, el desempeño de este sistema híbrido depende del gasto de inyección de gas, la presión de inyección del gas, el tipo de terminación y las velocidades de ascenso y descenso, entre otras. Los autores recomendaron realizar experimentos de laboratorio o pruebas de campo para verificar la efectividad de este sistema híbrido.

Capítulo 4

Desarrollo del modelo hidrodinámico del émbolo viajero

En este capítulo se presenta el desarrollo del modelo matemático propuesto para describir la operación del sistema de émbolo viajero. Para tal efecto, se considera que el ciclo de operación está conformado por cuatro etapas. En cada una de ellas, se plantean las ecuaciones de conservación de materia y cantidad de movimiento en los volúmenes de control característicos.

4.1 Aspectos generales

Los parámetros principales de operación y diseño del sistema del émbolo viajero son: presión del yacimiento, índice de productividad, características del fluido producido, estado mecánico del pozo, diseño del émbolo, y la presión en la superficie. En el caso de los sistemas asistidos con inyección de gas, adicionalmente se requieren la presión de inyección disponible y el diámetro de las válvulas de inyección superficial y subsuperficial. Los elementos principales del sistema de émbolo viajero se ilustran en la **Figura 4.1**.

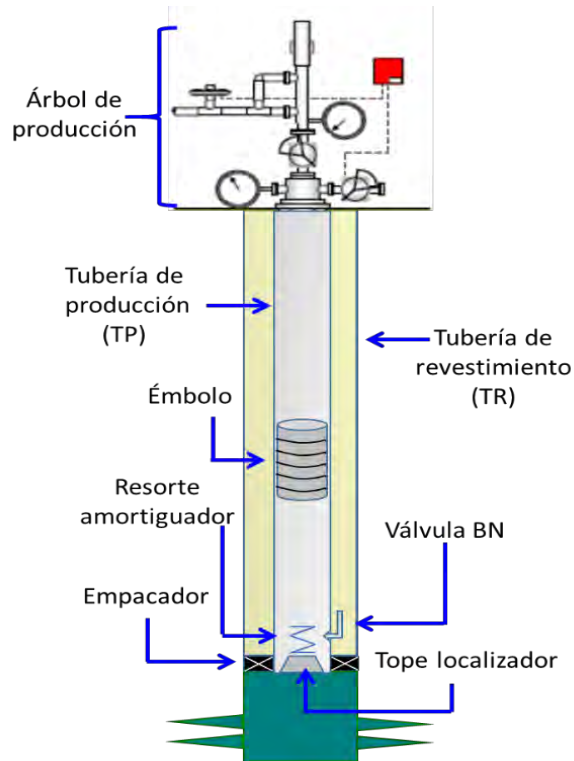


Figura 4.1 Elementos típicos de un sistema de émbolo viajero

En cuanto a los aspectos físicos considerados en el desarrollo del modelo para la operación del sistema de émbolo viajero, pueden mencionarse los siguientes: fricción del bache de líquido, expansión del gas por encima y por debajo del émbolo, presión de la línea de flujo, gasto de gas en la válvula de bombeo neumático y diámetro del estrangulador.

Como se describe en las secciones siguientes, el modelo está integrado por ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento, desarrolladas en volúmenes de control característicos en cada una de las etapas principales de operación del sistema. Asimismo, se utilizan la ecuación de estado de los gases ideales; la ecuación de Thornhill-Craver (1946) para el flujo de gas a través de un orificio; y la ecuación de Rawlins y Schellhardt (1935) para el comportamiento de afluencia en pozos de gas.

Como se mencionó en el Capítulo 2, pueden diferenciarse cuatro etapas en cada ciclo de operación de los sistemas del émbolo viajero:

1. Presurización del espacio anular
2. Carrera ascendente
3. Purga de gas
4. Carrera descendente

Las simplificaciones consideradas en el desarrollo del modelo son las siguientes:

- La presión en la línea de descarga es constante
- El flujo es isotérmico en todas las etapas del ciclo de operación
- Se desprecia el efecto de la fricción del émbolo en la carrera ascendente
- No se considera el efecto del flujo multifásico detrás del émbolo en la carrera ascendente
- No existe resbalamiento de líquido en la carrera ascendente
- Las velocidades características del émbolo en el seno de gas y en líquido durante la carrera descendente son diferentes, pero constantes
- No hay reinyección de fluidos al yacimiento
- El volumen del bache es un parámetro de entrada

Por otra parte, las principales variables hidrodinámicas que son función del tiempo en el planteamiento del modelo son las siguientes:

- Presiones en el espacio anular
- Presiones en la tubería de producción
- Velocidades del émbolo y el bache en la carrera ascendente
- Gasto másico de gas a la entrada del espacio anular
- Gasto másico de gas a la entrada de la tubería de producción
- Gasto másico de gas a la entrada de la línea de flujo
- Gasto másico de los fluidos aportados por el yacimiento
- Posición del émbolo

A continuación, se presenta el desarrollo de las ecuaciones propuestas en este trabajo para modelar los aspectos hidrodinámicos más importantes en cada una de las etapas mencionadas. Como caso general, se considera un sistema de émbolo viajero asistido con gas de inyección.

4.2 Presurización del espacio anular

Esta etapa comienza con la apertura de la válvula lateral de la TR, permitiendo el flujo de gas de bombeo neumático (BN) hacia el espacio anular. Con esta acción, la presión en la TR se incrementa. Es importante resaltar que el émbolo se encuentra en su posición más baja (fondo) y el nivel de líquido ha alcanzado su altura máxima (Figura 4.2).

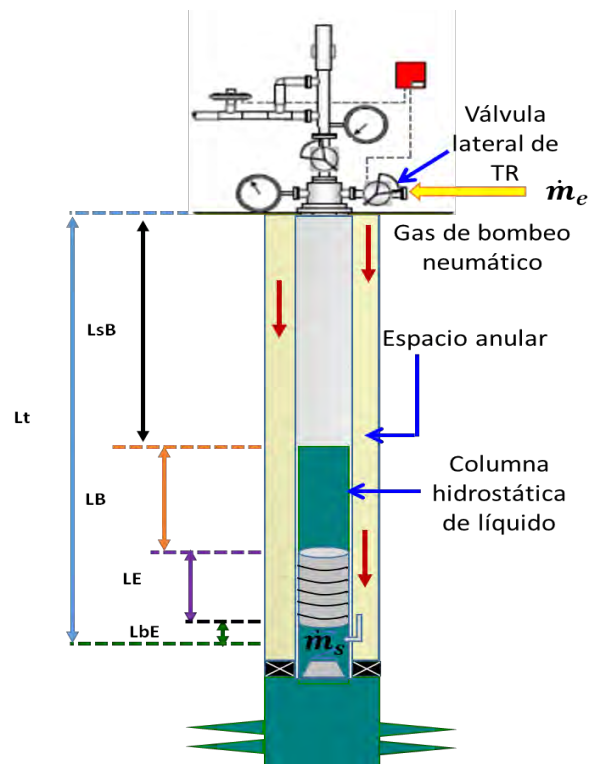


Figura 4.2 Presurización del sistema

La acumulación de gas en el espacio anular se representa por la ecuación de balance de materia siguiente:

$$dm/dt = -\dot{m}_s + \dot{m}_e . \quad \dots\dots\dots 4.1$$

Considerando que el gas se comporta idealmente, entonces la ec. 4.1 puede reescribirse como:

$$V \left(\frac{M}{RT} \right) \frac{dp_a}{dt} = -\dot{m}_s + \dot{m}_e . \quad \dots\dots\dots 4.2$$

Por lo tanto, con base en las variables geométricas de la Figura 4.2, y considerando la presión promedio en la TR (p_a), se obtiene:

$$\frac{dp_a}{dt} = \frac{-\dot{m}_s + \dot{m}_e}{\frac{A_{TR} L_t M}{RT}} . \quad \dots\dots\dots 4.3$$

El gasto másico de gas que entra en el espacio anular (\dot{m}_e) se calcula a partir de la ecuación de Thornhill-Craver:

$$q_g = \frac{C_n P_1 d_{ch}^2}{\sqrt{\gamma_g T_1 Z_g}} \sqrt{\left(\frac{k}{k-1} \right) - \left(y^{\frac{y}{2}} - y^{\frac{k+1}{k}} \right)} . \quad \dots\dots\dots 4.4$$

En cuanto al gasto másico que sale del espacio anular hacia la TP (\dot{m}_s), será cero durante el tiempo que dura la etapa, o hasta alcanzar un valor de presión equivalente al peso del émbolo y la columna hidrostática del bache de líquido.

Para pozos con émbolo viajero en su versión autónoma que cuentan con empacador, la ecuación 4.3 se sustituye por la expresión siguiente:

$$\frac{dp_{TP}}{dt} = \frac{-\dot{m}_{gsale} + \dot{m}_F}{\frac{A_{TP}L_T M}{RT}} \dots\dots\dots 4.5$$

En este caso, la inyección de gas de bombeo neumático y el flujo de gas a través de la válvula de bombeo neumático, se omiten al igualar \dot{m}_e y \dot{m}_s a cero durante todo el ciclo. Es decir, se acota el espacio de presurización al interior de la tubería de producción.

4.3 Carrera ascendente

Este periodo inicia cuando la válvula motora en la superficie se abre y el émbolo comienza a desplazarse hacia la superficie. La diferencial de presión entre el espacio anular y el interior de la TP provoca que el gas acumulado en el espacio anular comience a expandirse, empujando el émbolo y el bache de líquido hasta la superficie. Como puede observarse en la **Figura 4.3**, pueden diferenciarse tres sub-etapas: a) ingreso del gas de BN en la TP; b) movimiento (bache-émbolo) a lo largo de la TP; y c) producción del bache en la superficie.

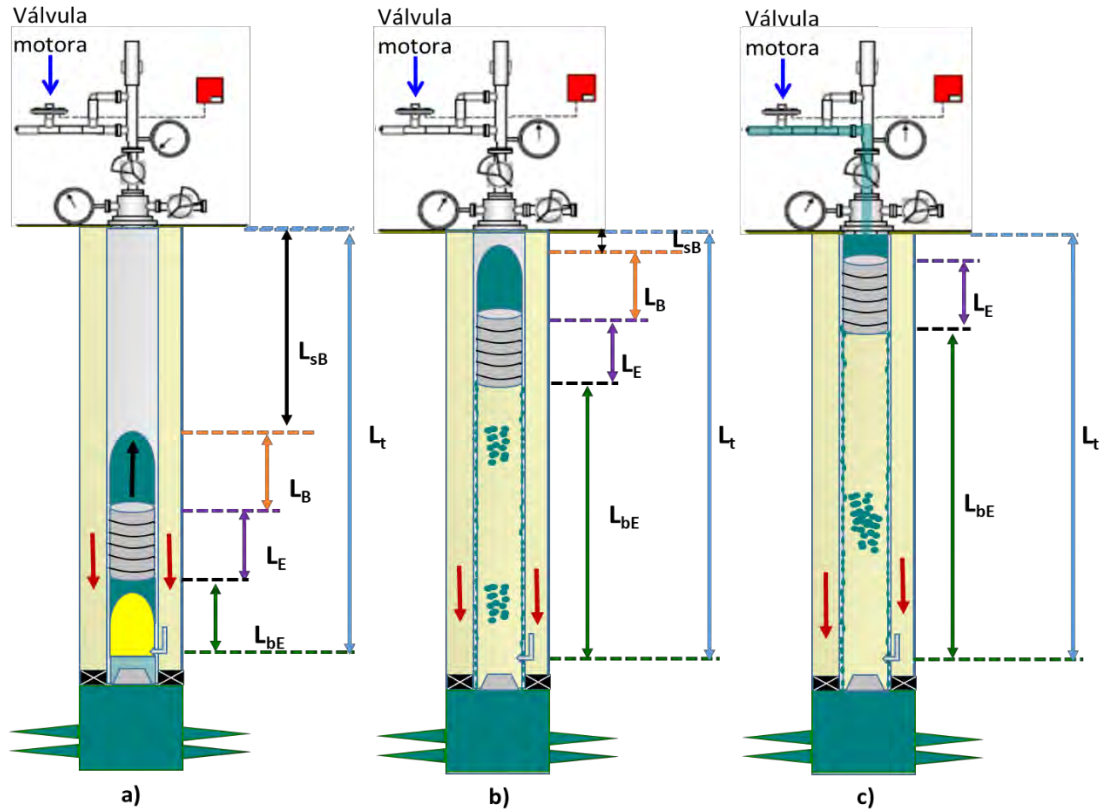


Figura 4.3 Carrera ascendente

a) Ingreso del gas de BN en la TP

El ingreso del gas de BN en la TP marca el inicio del movimiento del émbolo y el bache de líquido. Se presenta en el momento que la válvula motora instalada en la bajante del pozo pasa a posición abierta, originando una diferencial de presión entre la tubería de producción y espacio anular. El gas contenido en el espacio anular ingresa a la tubería de producción debajo del émbolo en forma de burbujas pequeñas, hasta formar una burbuja que ocupa prácticamente la totalidad de la sección transversal de la tubería, como se muestra en la **Figura 4.4**

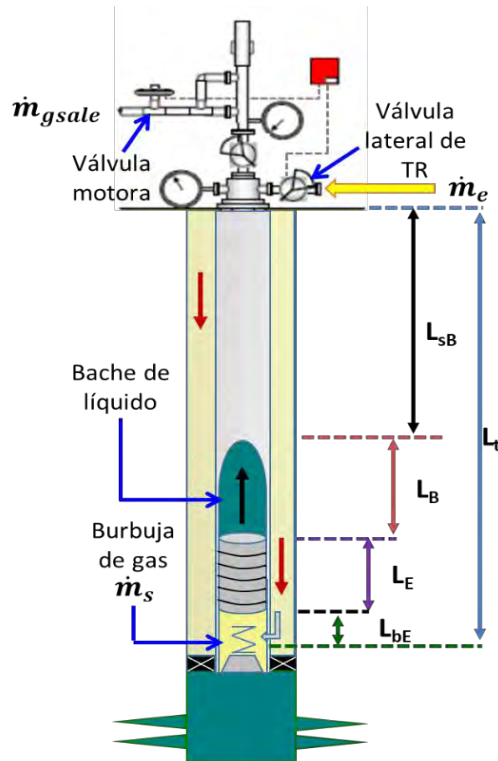


Figura 4.4 Ingreso del gas de BN en la TP

En este proceso ocurren tres fenómenos dentro de la tubería de producción:

1. La expansión del gas debajo del émbolo por efecto de la inyección de gas de bombeo neumático.
2. La expansión del gas encima del bache de líquidos derivado de la apertura de la válvula motora.
3. El movimiento del émbolo y bache de líquido por la diferencia de presión entre el espacio anular y tubería de producción.

La expansión del gas debajo del émbolo se modela de manera análoga a la etapa de presurización del espacio anular, mediante un balance de materia. Considerando las variables indicadas en la Figura 4.4, se tiene que:

$$\frac{dp_F}{dt} = \frac{\frac{\dot{m}_s RT}{MA_{TP}} - p_F V_z}{L_{bE}} \dots\dots\dots 4.6$$

En la versión autónoma con empacador es necesario remplazar el termino \dot{m}_s por \dot{m}_F en la ecuación 4.6

El comportamiento de la presión por encima del bache de líquido se obtiene aplicando un balance de materia para el gas contenido en la tubería de producción, de donde:

$$\frac{dp_{tp}}{dt} = \frac{\frac{-\dot{m}_{gsale} RT}{MA_{TP}} + p_{tp} V_z}{(L_B - L_E - L_{bE})} \dots\dots\dots 4.7$$

Debe notarse que las presiones calculadas a partir de las ecuaciones 4.3, 4.5, 4.6 y 4.7, corresponden a valores promedio en los volúmenes de control respectivos; para obtener valores locales de presión, en este trabajo se propone calcularlos de forma aproximada mediante una ecuación de gradiente de presión en régimen permanente.

b) Movimiento del émbolo y el bache de líquido en la TP

La descripción del movimiento del émbolo y el bache de líquido se obtiene mediante un balance de fuerzas: gravitacional, viscosas, y de las presiones ejercidas por debajo del émbolo y sobre la superficie del bache, como se ilustra en la **Figura 4.5**.

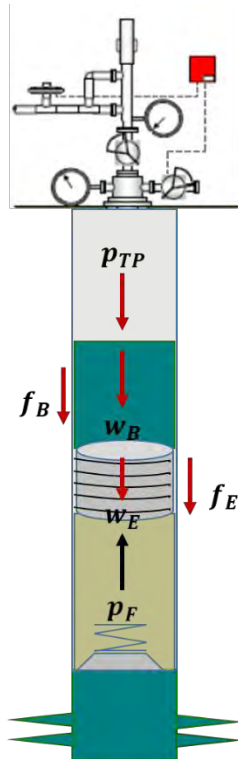


Figura 4.5 Balance de fuerzas sobre el émbolo y el bache de líquido en la tubería de producción

De acuerdo a la segunda Ley de Newton, la suma de todas las fuerzas externas que actúan sobre un sistema es igual a la razón de cambio respecto al tiempo del momento lineal de ese sistema. Por lo tanto, para un cuerpo rígido de masa m , esta ley se expresa como:

$$\sum F_Z = m \frac{dV_Z}{dt}. \quad \dots\dots\dots 4.8$$

En el sistema émbolo/bache actúan las fuerzas siguientes:

$$\sum F_Z = -w_E - \rho_L A_{TP} L_B g - \tau_B \rho_L (\pi D) L_B + p_{BE} A_{TP} - p_{SB} A_{TP}. \quad \dots\dots 4.9$$

Igualando la ecuación 4.8 con 4.9, e introduciendo el factor de fricción para el bache de líquido se obtiene que:

$$-w_E - \rho_L A_{TP} L_B g - \frac{f_b}{8} \rho_L (\pi D) L_B V_z^2 + p_{BE} A_{TP} - p_{SB} A_{TP} = m \frac{dV_z}{dt}. \quad \dots\dots 4.10$$

De donde:

$$\frac{dV_z}{dt} = \frac{-w_E - \rho_L A_{TP} L_B g - \frac{f_b}{8} \rho_L (\pi D) L_B V_z^2 + p_{BE} A_{TP} - p_{SB} A_{TP}}{\frac{w_E}{g} - \rho_L A_{TP} L_B}. \quad \dots\dots 4.11$$

Debe observarse que:

$$\frac{dL_{bE}}{dt} = V_z. \quad \dots\dots\dots 4.12$$

El movimiento del sistema émbolo/bache a lo largo de la TP, se mantendrá si las condiciones de inyección de gas de bombeo neumático y posición abierta de la válvula motora no cambian (**Figura 4.6**). Bajo estas condiciones, continuará el ascenso impulsado por el gas que entra a la TP.

Como simplificación en la formulación del modelo para esta etapa del ciclo de operación del sistema, no se considera el escurrimiento de líquido ni su arrastre por el gas que entra a la TP.

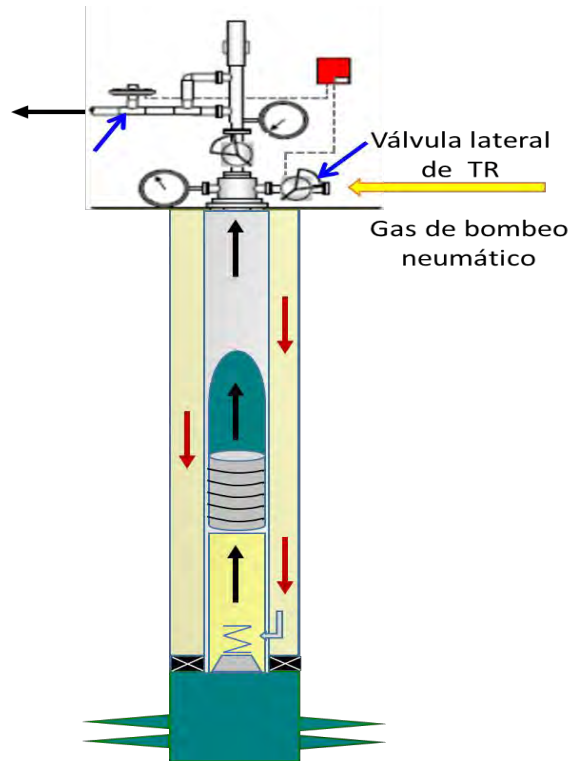


Figura 4.6 Movimiento del bache líquido y émbolo en la TP

c) Producción del bache

Esta etapa corresponde a la producción del bache en la superficie. Debido a que el tamaño del bache en la TP disminuye conforme pasa hacia la línea de descarga, la resistencia al flujo disminuye y el resto del bache se acelera. La etapa termina cuando todo el bache se ha descargado del pozo y el émbolo llega a la superficie (**Figura 4.7**).

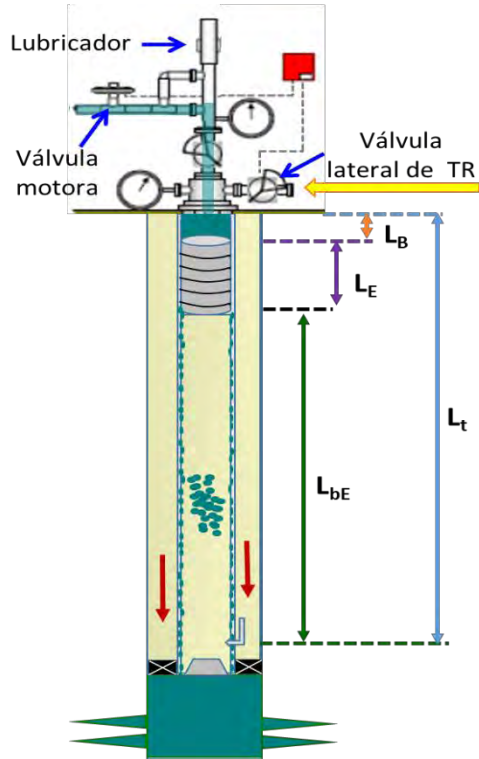


Figura 4.7 Producción del bache

Para modelar la dinámica del sistema en esta etapa, se aplica la segunda Ley de Newton, de tal forma que:

$$\sum F = \frac{dmV}{dt} = \frac{d}{dt} [\rho_L V_{TP} L_B A_{TP}] + [\rho_L A_{TP} V_{TP}^2]. \quad \dots\dots\dots 4.13$$

La suma de fuerzas que actúan sobre el sistema es la siguiente:

$$\sum F = -w_E - \rho_L A_{TP} L_B g - \frac{f_b}{8} \rho_L (\pi D) L_B V_z^2 + p_{BE} A_{TP} - \frac{K \rho_L V_L^2}{2g} A_{TP} - p_L A_{TP}. \quad \dots 4.14$$

De las ecuaciones 4.13 y 4.14, se obtiene finalmente:

$$\frac{dV_z}{dt} = \frac{\sum F}{\rho_L A_{TP}} - V_L^2 + V_{TP}/L_t - L_E - L_{bE}. \quad \dots\dots\dots 4.15$$

Debe observarse que en la formulación de las ecuaciones 4.11, y 4.14 no se consideraron las pérdidas de presión por la fricción causadas por el gas ni por el émbolo.

4.4 Purga de gas

Una vez que el bache de líquido se ha descargado totalmente del pozo, el gas fluirá libremente hacia la línea de descarga mientras la válvula motora permanezca abierta, y el émbolo se mantenga retenido en la superficie (Figura 4.8).

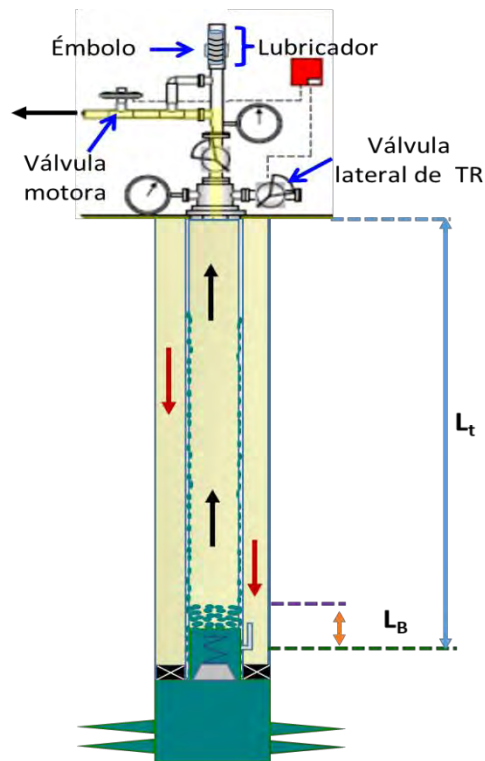


Figura 4.8 Purga de gas

Dependiendo del tipo de pozo o campo, existen diferentes combinaciones de operación del émbolo viajero. Al respecto, en este trabajo se considera que la inyección de gas de BN termina cuando el bache se ha descargado totalmente. En estas condiciones, la TP y la TR comenzarán a despresurizarse.

La ecuación que describe el ritmo de despresurización de la TP se obtiene al aplicar un balance de materia para el gas:

$$\frac{dp_{TP}}{dt} = \frac{-\dot{m}_{gsale} + [\dot{m}_s + \dot{m}_F]}{\frac{A_{TP}L_tM}{RT}} \dots\dots\dots 4.16$$

Por otra parte, el ritmo de despresurización del espacio anular se expresa mediante la ecuación 4.3, haciendo el término \dot{m}_e igual a cero debido a la suspensión de la inyección de gas en la superficie.

Para un yacimiento de gas, el gasto másico que entra al pozo se calcula por medio de la ecuación de Rawlins y Schellhardt (1935):

$$\dot{m}_F = \rho_g C (P_R^2 - P_{WF}^2)^n \dots\dots\dots 4.17$$

La solución simultánea de las ecuaciones 4.3, 4.16, y 4.17 permite estudiar el comportamiento dinámico del sistema durante la etapa de purga de gas. Esta etapa concluye cuando se alcanza la presión de TR pre-establecida en el controlador superficial.

4.5 Carrera descendente

Comienza en el instante en que se cierra la válvula motora y el émbolo (alojado en superficie) cae al fondo del pozo. En este momento, la inyección de gas de BN en el espacio anular continúa suspendida hasta finalizar la etapa. Para la formulación del modelo hidrodinámico del sistema en esta etapa, se considera que:

1. El bache de líquido está completamente desarrollado.
2. El émbolo cae a velocidad constante, pero a diferente valor en el seno de gas y de líquido.

3. La velocidad de caída en el líquido (V_{Foil}) depende del tipo de émbolo (Mower y Lea 1985). Los autores Bello, Falcone, Xu y Scott (2011) estimaron un valor promedio de 2 m/s, el cual se utiliza en este trabajo.
4. La velocidad de caída del émbolo en el gas (V_{Fg}) no sólo depende del tipo de émbolo, sino también de la presión. Mower y Lea (1985). Bello, Falcone, Xu y Scott (2011) estimaron un valor medio de 1.5 m/s, mismo que se utiliza en el presente modelo.
5. La presión de la línea (P_L) es constante y esencialmente igual a la presión del separador.

Para calcular la posición del émbolo en la carrera descendente en las fases gas y líquido, se utilizan respectivamente las ecuaciones siguientes:

$$\frac{dL_{bE}}{dt} = V_{Fg} \cdot \dots\dots\dots 4.18$$

$$\frac{dL_{bE}}{dt} = V_{Foil} \cdot \dots\dots\dots 4.19$$

Capítulo 5

Programa de cómputo

En este capítulo se describe el programa de cómputo desarrollado para estudiar la hidrodinámica de los sistemas de émbolo viajero. El programa está basado en el modelo descrito en el capítulo 4, y permite calcular la posición y velocidad de ascenso del émbolo, los requerimientos de presión en el espacio anular, el comportamiento de la presión en la tubería de producción, el tamaño del bache y la duración del ciclo de operación.

5.1 Descripción del programa

El lenguaje de programación empleado es Microsoft Visual Basic, integrado en la aplicación Microsoft Office Excel. Se desarrolló en un ambiente conocido como “macroinstrucción”, la cual es una serie de instrucciones que se almacenan para ejecutarse de manera secuencial mediante una sola llamada.

La interfaz de entrada de datos se diseñó en una hoja de Excel, como se muestra en la **Figura 5.1**. En ella se capturan las características del sistema, así como las condiciones iniciales del modelo. Permite la visualización de los resultados de cada etapa del ciclo de operación del émbolo viajero.



Figura 5.1 Interfaz del programa

5.2 Estructura de programa

El programa consta de once módulos cuyas funciones son: lectura de datos, homologación de unidades, cálculo de constantes, verificación de condiciones iniciales, incremento de la presión en espacio anular, elevación del émbolo, producción del bache de líquido, producción de gas, caída del émbolo y almacenamiento, e impresión de resultados. Las características de cada módulo se describen a continuación.

5.2.1 Módulo 1: “Menú”

Este módulo contiene la declaración de las variables globales utilizadas, y un menú general con la secuencia de las subrutinas a utilizar conforme a la operación del sistema émbolo viajero (**Figura 5.2**).

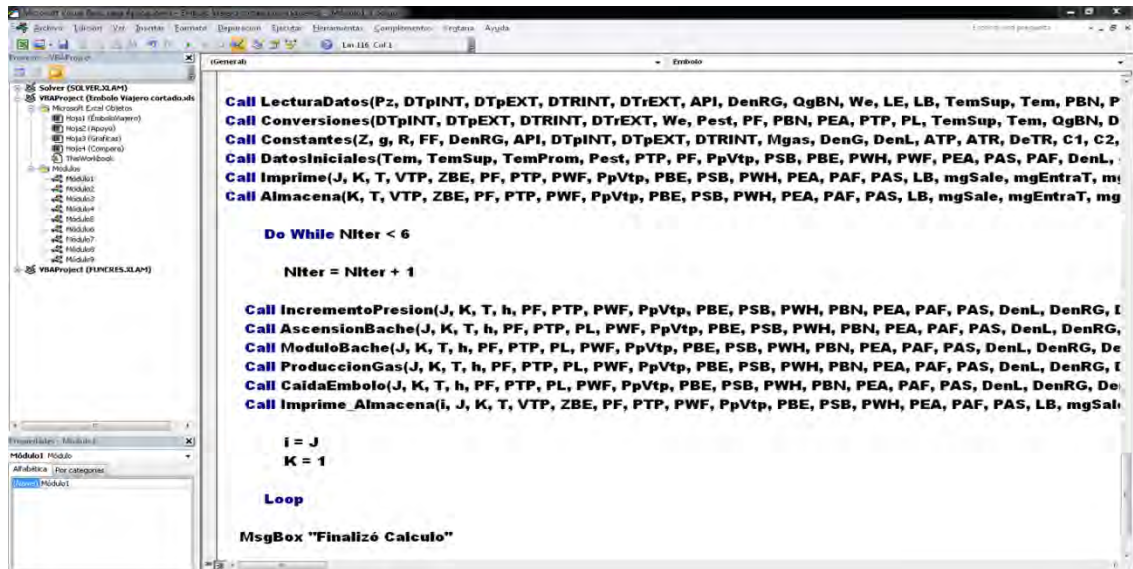


Figura 5.2 Módulo 1: “Menú”

5.2.2 Módulo 2: “Lectura de datos”

Está conformado por funcionalidades para leer los datos de entrada de la interfaz del programa, asignando cada uno de ellos a las variables globales definidas en el módulo 1. La información almacenada hace referencia a las características del pozo y condiciones iniciales (Figura 5.3).

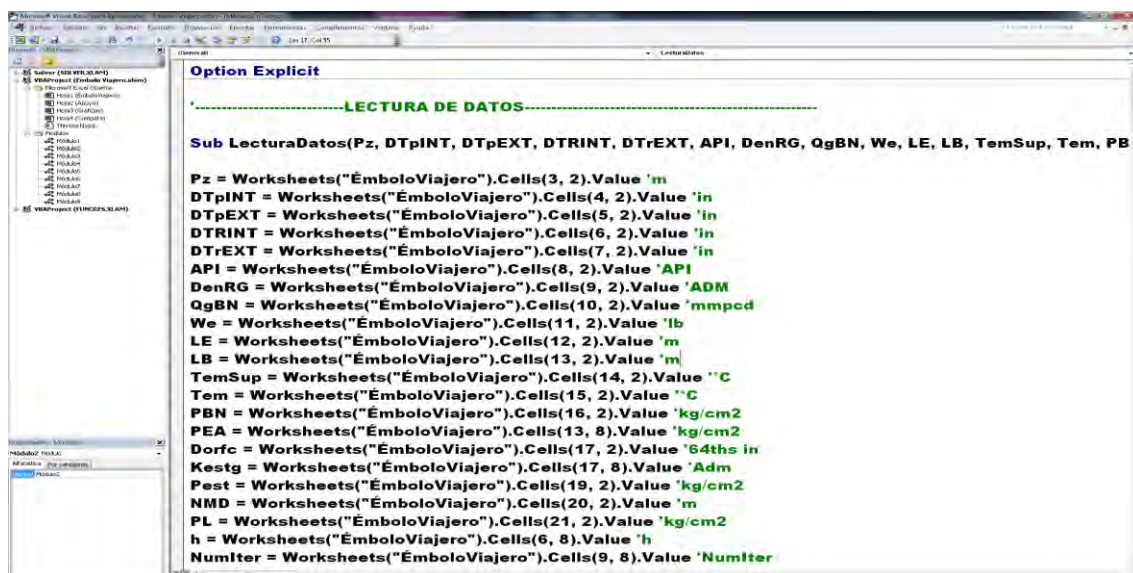


Figura 5.3 Módulo 2: “Lectura de datos”

5.2.3 Módulo 3: “Unidades”

En este módulo se realiza la conversión de las unidades de los datos de entrada del programa. Las ecuaciones que integran el modelo se resuelven considerando el Sistema Internacional de Unidades (Figura 5.4).

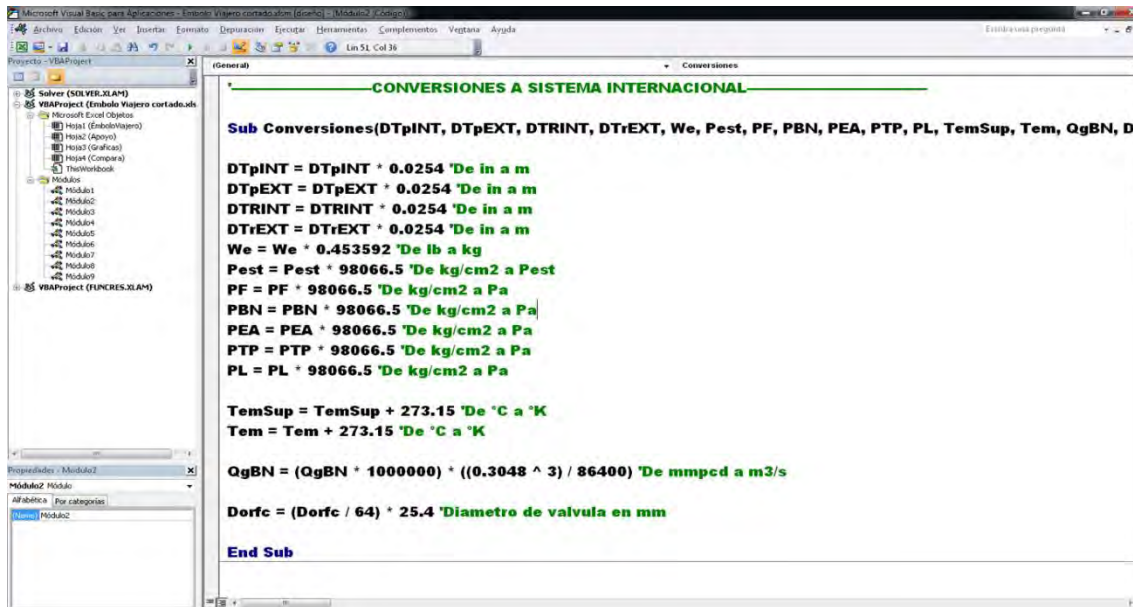


Figura 5.4 Módulo 3: “Unidades”

5.2.4 Módulo 4: “Constantes”

En este módulo se declaran las constantes que se utilizan en las diferentes ecuaciones diferenciales que integran el modelo (Figura 5.5).

```

Microsoft Visual Studio 2010
-----CONSTANTES-----
Sub Constantes(Z, g, R, FF, DenRG, API, DTpINT, DTpEXT, DTRINT, Mgas, DenG, DenL, ATP, ATR, DeTR, C1,
Dim Pi As Double
Dim Maire As Double
Dim DenAire As Double
Dim DenAgua As Double
Pi = 3.141592654
g = 9.80665 'm/s2
R = 8.314472 'm3-Pa / K-mol
Maire = 28.97 'gr/mol
DenAire = 1.2238106 'kg/m3
DenAgua = 1000 'kg/m3
Z = 1
FF = 0.01
-----PROPIEDADES
Mgas = (DenRG * Maire) * 0.001 'kg/mol
DenG = DenRG * DenAire 'kg/m3
DenL = (141.5 / (API + 131.5)) * DenAgua 'kg/m3
-----CALCULO DE AREAS
ATP = Pi * (DTpINT / 2) ^ 2
ATR = (Pi * (DTRINT / 2) ^ 2) - (Pi * (DTpEXT / 2) ^ 2)
AL = Pi * ((DorfC + 0.001) / 2) ^ 2
-----CALCULO DE DIAMETRO EQUIVALENTE TR
DeTR = Sqr((4 * ATR) / Pi)
-----CALCULO DE CONSTANTES
C1 = (FF / 8) * (DenL * Pi * DTpINT)
End Sub

```

Figura 5.5 Módulo 4: “Constantes”

5.2.5 Módulo 5: “Datos iniciales”

En este módulo se inician todas las variables utilizadas en el programa (Figura 5.6).

```

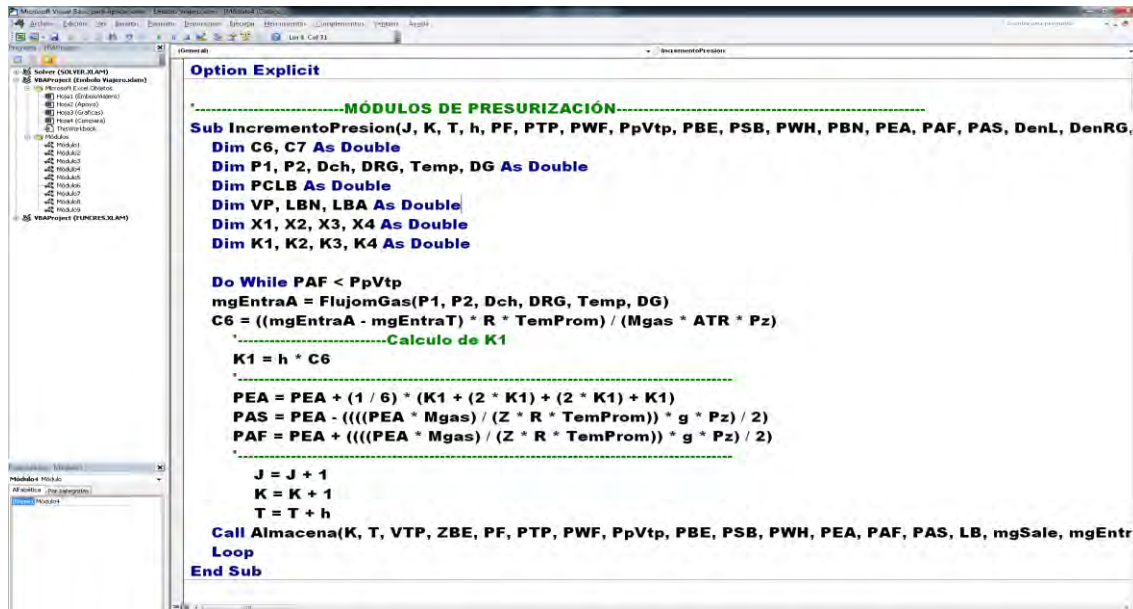
Microsoft Visual Studio 2010
-----DATOS INICIALES-----
Sub DatosIniciales(Tem, TemSup, TemProm, Pest, PTP, PF, PpVtp, PSB, PBE, PWH, PWF, PEA, PAS, PAF, De
Dim PCLB As Double
Dim Pres As Double
Dim CL, Prof As Double
TemProm = (Tem + TemSup) / 2
-----PRESIÓN BAJO EL ÉMBOLO
PBE = PF - (DenL * g * (NMD - Pz))
Call LongitudBache(PBE, PTP, Mgas, Z, R, TemProm, g, We, ATP, DenL, Pz, LB)
Pres = PTP
Prof = Pz - LB
PSB = GradienteGas(Mgas, g, Prof, Z, R, TemProm, Pres)
PCLB = (We / ATP) + (DenL * g * LB)
PBE = PCLB + PSB
PWH = PTP
PTP = (PWH + PSB) / 2 'Presión promedio arriba del bache
PpVtp = PBE
PF = PBE 'Presión promedio abajo del embolo
PWF = PpVtp + (We / ATP) + (DenL * g * (NMD - Pz))
-----PRESIÓN EN EL ESPACIO ANULAR
Pres = PEA
Prof = Pz
PAF = GradienteGas(Mgas, g, Prof, Z, R, TemProm, Pres)
PAS = PEA
PEA = (PAS + PAF) / 2
-----GASTO MASICO
mgSale = 0#
mgEntraT = 0#

```

Figura 5.6 Módulo 5: “Datos iniciales”

5.2.6 Módulo 6: “Presurización del sistema”

Este módulo está conformado por funcionalidades para calcular la presurización del espacio anular, mediante la resolución numérica de la ecuación diferencial (4.3). Para tal efecto, se utiliza el método de Runge-Kutta de cuarto orden (**Figura 5.7**).



```
Option Explicit

-----MÓDULOS DE PRESURIZACIÓN-----
Sub IncrementoPresion(J, K, T, h, PF, PTP, PWF, PpVtp, PBE, PSB, PWH, PBN, PEA, PAF, PAS, DenL, DenRG,
Dim C6, C7 As Double
Dim P1, P2, Dch, DRG, Temp, DG As Double
Dim PCLB As Double
Dim VP, LBN, LBA As Double
Dim X1, X2, X3, X4 As Double
Dim K1, K2, K3, K4 As Double

Do While PAF < PpVtp
mgEntraA = FlujomGas(P1, P2, Dch, DRG, Temp, DG)
C6 = ((mgEntraA - mgEntraT) * R * TemProm) / (Mgas * ATR * Pz)
-----Calculo de K1
K1 = h * C6
-----
PEA = PEA + (1 / 6) * (K1 + (2 * K1) + (2 * K1) + K1)
PAS = PEA - (((PEA * Mgas) / (Z * R * TemProm)) * g * Pz) / 2)
PAF = PEA + (((PEA * Mgas) / (Z * R * TemProm)) * g * Pz) / 2)
-----
J = J + 1
K = K + 1
T = T + h
Call Almacena(K, T, VTP, ZBE, PF, PTP, PWF, PpVtp, PBE, PSB, PWH, PEA, PAF, PAS, LB, mgSale, mgEntr
Loop
End Sub
```

Figura 5.7 Módulo 6: “Presurización del sistema”

5.2.7 Módulo 7: “Carrera ascendente”

En este módulo se resuelve el sistema de seis ecuaciones diferenciales ordinarias que describen la hidrodinámica del sistema durante el ascenso del émbolo y el bache de líquido, mediante el método Runge-Kutta de cuarto orden. Se calculan: presiones en el espacio anular, presiones en la tubería de producción, velocidades del émbolo y el bache, gasto másico de gas a la entrada del espacio anular, gasto másico de gas a la entrada de la tubería de producción, y posición del émbolo (**Figura 5.8**).

```

-----MÓDULO CARRERA ASCENDENTE-----
Sub AscensionBache(J, K, T, h, PF, PTP, PL, PWF, PpVtp, PBE, PSB, PWH, PBN, PEA, PAF, PAS, DenL, DenR)
Dim C3, C4, C6 As Double
Dim P1, P2, Dch, DRG, Temp, DG As Double
Dim PCLB As Double
Dim K1 As Double
Do While ZBE < (Pz - LB - LE)
    If PAF > PpVtp Then
        P1 = PAF
        P2 = PpVtp
        Dch = 0.5 * 25.4
        DRG = DenRG
        Temp = TemProm
        DG = DenG
        mgEntraT = FlujomGas(P1, P2, Dch, DRG, Temp, DG)
        C3 = (mgEntraT * R * TemProm) / (Mgas * ATP)
        P1 = PWH
        P2 = PL
        Dch = Dorfc
        Temp = TemSup
        mgSale = FlujomGas(P1, P2, Dch, DRG, Temp, DG)
        C4 = (-mgSale * R * TemSup) / (Mgas * ATP)
        Call RungeKutta(VTP, ZBE, PF, PTP, h, We, DenL, g, LB, ATP, C1, C3, C4, Mgas, Z, R, TemProm)
        If PTP < PL Then
            PTP = PL
        End If
        PBE = PF - (((PF * Mgas) / (Z * R * TemProm)) * g * ZBE) / 2)
    End While
End Sub

```

Figura 5.8 Módulo 7: “Carrera ascendente”

5.2.8 Módulo 8: “Producción del bache de líquido”

En este módulo (Figura 5.9) se resuelven simultáneamente seis ecuaciones diferenciales para la hidrodinámica del sistema en esta etapa, aplicando el método Runge-Kutta de cuarto orden. Cabe señalar que la ecuación correspondiente a la conservación de cantidad de movimiento del bache de líquido que se resuelve es la (4.15).

```

-----MÓDULOS PRODUCCIÓN DEL BACHE DE LIQUIDO-----
Sub ModuloBache(J, K, T, h, PF, PTP, PL, PWF, PpVtp, PBE, PSB, PWH, PBN, PEA, PAF, PAS, DenL, DenRG, D
Dim C3, C6 As Double
Dim VL As Double
Dim NumIter, NumIter1 As Double
Dim P1, P2, Dch, DRG, Temp, DG As Double
Dim K1 As Double
Do While LB > 0.02 And VTP > 0
    P1 = PAF
    P2 = PpVtp
    Dch = 0.5 * 25.4
    DRG = DenRG
    Temp = TemProm
    DG = DenG
    mgEntraT = FlujomGas(P1, P2, Dch, DRG, Temp, DG)
    C3 = (mgEntraT * R * TemProm) / (Mgas * ATP)
    mgSale = 0#
    If LB < 20 And LB > 1 Then
        NumIter = K
        h = 0.0001
    End If
    If LB < 1 Then
        NumIter1 = K
        h = 0.00001
    End If
    Call LB_Calculo(LB, Pz, ZBE, LE)
    Call VL_Calculo(VL, ATP, VTP, AL, J)
    Call RungeKutta_Bache(VTP, ZBE, PF, PTP, h, We, DenL, g, LB, ATP, C1, C3, Mgas, Z, R, TemProm, Pz, l

```

Figura 5.9 Módulo 8: “Producción del bache de líquido”

5.2.9 Módulo 9: “Producción de gas”

En este módulo (Figura 5.10) se calculan: presiones en el espacio anular, presiones en la tubería de producción, gasto másico de gas a la entrada de la tubería de producción, gasto másico de gas a la entrada de la línea de flujo y gasto másico de los fluidos aportados por el yacimiento. Para tal efecto, se resuelven las ecuaciones (4.3), (4.7) y (4.17).


```

Módulos Producción de Gas
Sub ProduccionGas(J, K, T, h, PF, PTP, PL, PWF, PpVtp, PBE, PSB, PWH, PBN, PEA, PAF, PAS, DenL, DenRG,
Dim C7, C6, C5, TEP As Double
Dim P1, P2, Dch, DRG, Temp, DG As Double
Dim K1, K2, K3 As Double
Dim Pest, NMD, Qomax, Qo, mLEntra, LBO As Double
Do While PAS > 20 * 98066.5
    mgEntraT = FlujomGas(P1, P2, Dch, DRG, Temp, DG)
    mgSale = FlujomGas(P1, P2, Dch, DRG, Temp, DG)
    C5 = ((mgEntraT - mgSale) * R * TemProm) / (Mgas * ATP * (Pz - LB))
    If T < TEP Then
        mgEntraA = FlujomGas(P1, P2, Dch, DRG, Temp, DG)
        C6 = ((mgEntraA - mgEntraT) * R * TemProm) / (Mgas * ATR * Pz)
    Else
        mgEntraA = 0#
        C6 = ((mgEntraA - mgEntraT) * R * TemProm) / (Mgas * ATR * Pz)
    End If
    -----Calculo de Presion en Anular
    K1 = h * C6
    -----
    PEA = PEA + (1 / 6) * (K1 + (2 * K1) + (2 * K1) + K1)
    PAS = PEA - (((PEA * Mgas) / (Z * R * TemProm)) * g * Pz) / 2)
    PAF = PEA + (((PEA * Mgas) / (Z * R * TemProm)) * g * Pz) / 2)
    -----Calculo de Presion en la Tuberia
    K2 = h * C5
    -----
    PF = PF + (1 / 6) * (K2 + (2 * K2) + (2 * K2) + K2)
    PTP = PF

```

Figura 5.10 Módulo 9: “Producción de gas”

5.2.10 Módulo 10: “Carrera descendente”

En este módulo se resuelve la ecuación diferencial que permite calcular la posición del émbolo en su descenso, a través del gas o líquido, así como el tiempo que tarda en llegar al fondo del pozo (Figura 5.11).

```

Option Explicit
*-----MÓDULOS CAQDA DEL ÉMBOLO-----*
'Plunger fall velocity in gas, uPFG 400 (ft/min) 2.032 (m/s)
'Plunger fall velocity in liquid, uPFL (ft/min) 1.524 (m/s)
Sub CaidaEmbolo(J, K, T, h, PF, PTP, PL, PWF, PpVtp, PBE, PSB, PWH, PBN, PEA, PAF, PAS, DenL, DenRG, D
uPFG = 2.032 '(m/s)
uPFL = 1.524 '(m/s)
NvG = Pz - LB
ZFE = 0#
Do While ZFE < Pz
  If ZFE < NvG Then
    *-----CAIDA DEL ÉMBOLO EN GAS-----*
    VTP = uPFG
    K3 = h * uPFG
  Else
    *-----CAIDA DEL ÉMBOLO EN LIQUIDO-----*
    VTP = uPFL
    K3 = h * uPFL
  End If
  ZFE = ZFE + (1 / 6) * (K3 + (2 * K3) + (2 * K3) + K3)
  ZBE = Pz - ZFE
  If ZBE < 0# Then
    ZBE = 0#
  Else
    End If
Loop
End Sub

```

Figura 5.11 Módulo 10: “Carrera descendente”

5.2.11 Módulo 11: “Impresión de resultados”

La cantidad de datos generados por el programa puede ser considerablemente alta, dependiendo del paso de tiempo que se asigne en la sección de datos de entrada. Por lo regular un paso de tiempo aceptable es de 0.1 segundos; sin embargo, en los cálculos correspondientes al ascenso de émbolo y durante la producción del bache se requiere un paso de tiempo de 0.01 segundos. Por tal razón, se integró la opción de elegir el paso de tiempo para imprimir los resultados conforme se van generando. Lo datos se presentan en forma gráfica y tabular (**Figura 5.12**).

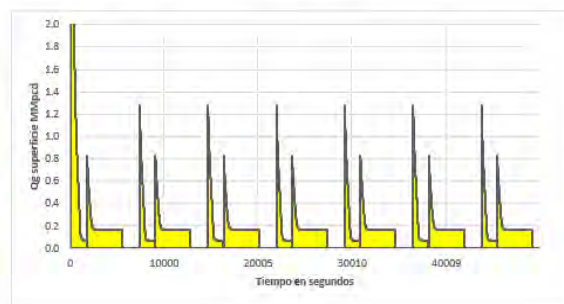
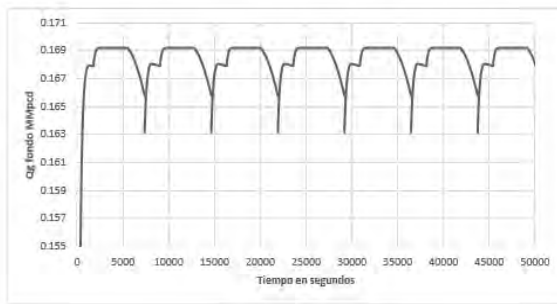
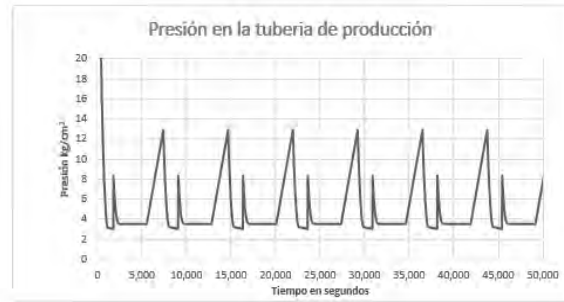
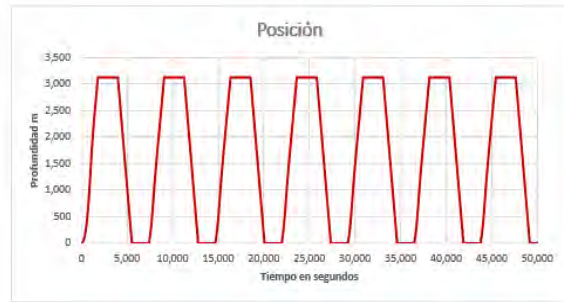
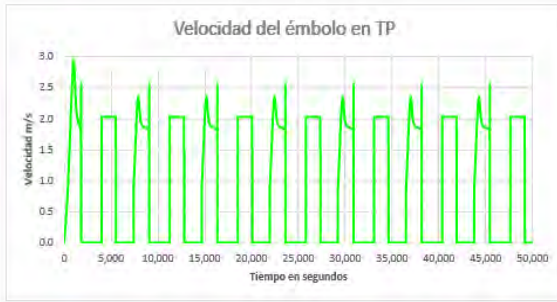


Figura 5.12 Módulo 11: “Impresión de resultados”

Capítulo 6

Estudio de campo

En este capítulo se describen las características, antecedentes y condiciones de operación típicas del pozo que se utilizará en la validación del modelo hidrodinámico desarrollado en el presente trabajo. El pozo se encuentra localizado en un campo productor de gas húmedo en México, y opera con un sistema de émbolo viajero debido a que presenta acumulación de líquido en el fondo.

6.1 Descripción del yacimiento

El sistema analizado corresponde a un campo productor de gas húmedo asociado ubicado en el Estado de Veracruz. El campo se descubrió en junio de 1976 y consta de 50 pozos perforados, de los cuales 19 se encuentra en operación actualmente. En 1998 alcanzó una producción máxima histórica de 30 MMpcd de gas. En cuanto a la producción de condensados, en el año 1981 se logró un máximo de 2,300 bpd.

La formación productora corresponde a rocas calizas naturalmente fracturadas, de permeabilidad baja y altamente heterogéneas. Sus características petrofísicas más relevantes son: porosidad de 2%, permeabilidad de 0.03 md, saturación de agua de 50 %, y volumen de arcilla de 30%.

La presión inicial y la temperatura del yacimiento son: 340 kg/cm² y 96°C, respectivamente. Actualmente, la presión promedio del yacimiento se encuentra en

un rango de 70 a 50 kg/cm². El gas tiene una densidad relativa de 0.665, y el condensado producido es de 36°API. De acuerdo con la composición del gas, se trata de un gas amargo, con 1 a 3 % mol de H₂S.

El factor de recuperación en reservas 1P para el condensado es de 9% y para el gas de 48%, de un esperado de 9% y 49% respectivamente. Al tratarse de un campo maduro despresurizado, requiere de sistemas de mantenimiento de presión para continuar con su vida productiva; sin embargo, en su plan de explotación no se tiene contemplado un proyecto de estas características o la perforación de nuevos pozos.

Para el manejo de la producción del campo se cuenta con cuatro macroperas y 18 peras, que en conjunto aportan 8 MMpcd de gas húmedo amargo, 48 barriles de condensados y 92 barriles de agua congénita. La recolección se realiza a través de 36 ductos que conforman una red de 30 km.

En cuanto a los pozos, se terminaron en forma convencional a una profundidad aproximada de 3200 mv, con tubería de explotación de 6 5/8", aparejo de producción de 2 7/8" y empacador de 6 5/8".

Entre las problemáticas que presenta los pozos, la más importante es la acumulación de agua y/o condensados en el fondo, que pueden reducir la producción de gas hasta el punto de impedirla totalmente. Por lo tanto, dos de los 19 pozos en operación cuentan con un sistema de compresión a boca de pozo y diez con sistema de émbolo viajero.

La estrategia actual para mejorar las condiciones de explotación del campo se basa en la optimización de los sistemas artificiales de producción: mejorador de flujo en fondo (tipo Venturi), émbolo viajero, tubería capilar, y sarta de velocidad, por mencionar algunos.

6.2 Características y condiciones de operación del pozo analizado

6.2.1 Antecedentes

El pozo "A" fue terminado en agosto de 1982 en el intervalo 3216 – 3227 mv, resultando productor de gas y condensado, con una producción de 0.993 MMpcd, presión en cabeza de 43 kg/cm², y estrangulador de 1/4". Seis años después, en septiembre de 1988 se realizó una ampliación de intervalo (3206 - 3231 mv) con el objetivo de incrementar su producción; sin embargo, el pozo produjo 0.29 MMpcd con una presión en cabeza de 61 kg/cm², por un estrangulador de 1/4".

En agosto de 1992 se corrigió una anomalía en las tuberías de revestimiento (TR) y se instaló un sistema de émbolo viajero, alcanzando una producción de 0.9 MMpcd de gas y 2 Mbpd de líquido, con una presión en cabeza de 30 kg/cm² y estrangulador de 5/16". Esta producción fue decayendo hasta quedar cerrado el pozo por nulo aporte en mayo del 2000.

En enero de 2001 se realizó una reparación mayor para aislar el intervalo 3206-3221 mv e incorporar a producción el intervalo 3180-3190 mv. El pozo quedó operando como productor de gas húmedo con un gasto de 1 MMpcd de gas, presión en cabeza de 39 kg/cm² y estrangulador de 1/4".

En la **Figura 6.1** se muestra el histórico de producción del pozo entre el año 2001 y el 2015. Como puede observarse, se diferencian claramente dos periodos de producción. En el primero, la tasa de declinación fue de 12.2 % anual, y estuvo asociada a la despresurización del yacimiento. En el segundo periodo, la tasa de declinación fue de 76.9 % anual, y se atribuyó al problema de carga de líquidos en el fondo. El pozo se cerró en diciembre del 2013 por aporte nulo de fluidos.

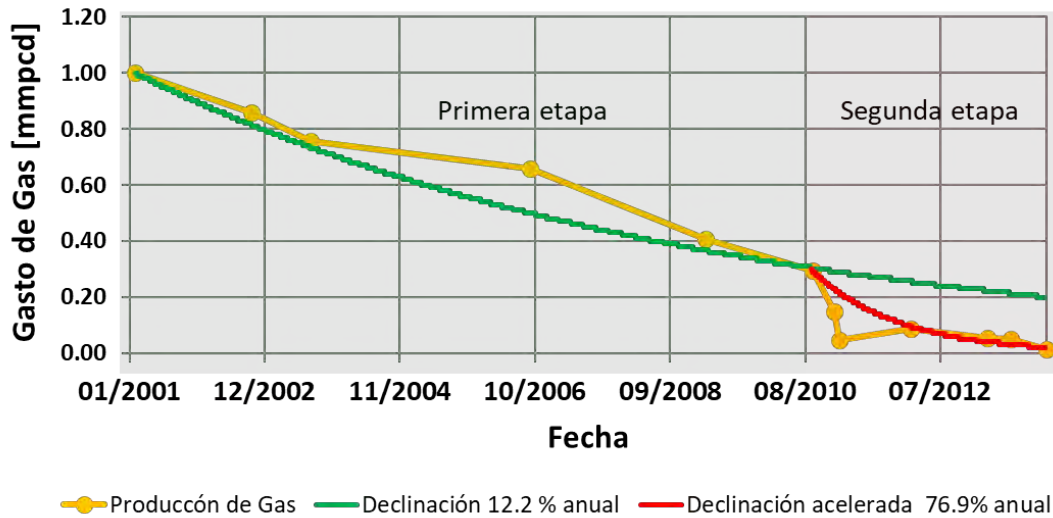


Figura 6.1 Comportamiento de producción del pozo “A”

En diciembre de 2015 se realizó una reparación menor, que consistió en instalar el sistema de émbolo viajero en el pozo “A”, con el objetivo de reincorporarlo a producción. El estado mecánico (**Figura 6.2**) quedó conformado de la manera siguiente:

- Pozo vertical de 3330 metros
- Tubería de revestimiento (TR) de 6 5/8 pulgadas hasta 3322 m
- Tubería de producción (TP) de 2 7/8 pulgadas hasta 3147 m
- Empacador de producción a 3147 m
- Árbol de producción de 13 3/8”, 9 5/8”, 6 5/8” x 2 7/8”
- Tope localizador a 3138.7 m
- Resorte amortiguador a 3137 mv
- Intervalo productor 3180-3190 m
- Sistema de producción émbolo viajero

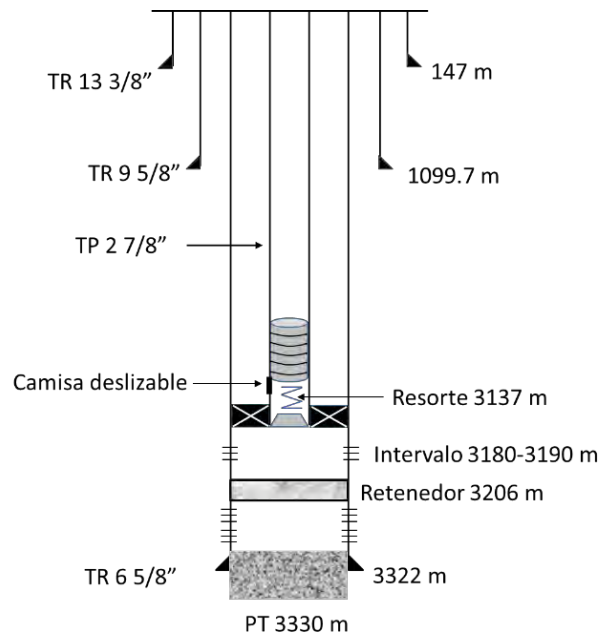


Figura 6.2 Estado mecánico

En noviembre del 2016 se realizó un registro de presión por estaciones a pozo cerrado (**Figura 6.3**), determinándose una presión estática de 70.87 kg/cm² y una temperatura de 88.19°C a 3175 mv. La presión calculada al nivel medio disparado (NMD) fue de 71.87 kg/cm².

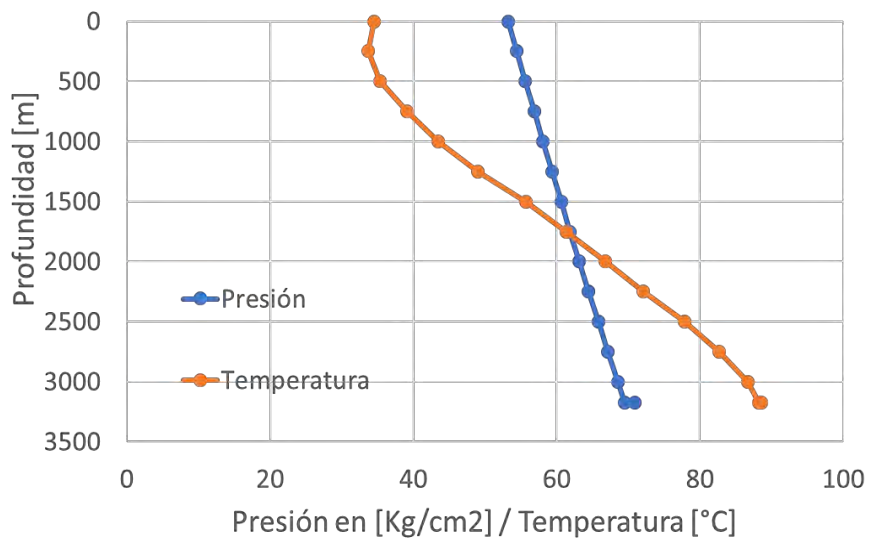


Figura 6.3 Registro de presión de fondo

El gradiente de presión promedio en el registro estático fue de 0.0046 kg/cm²/m, indicativo de la presencia de gas en toda la tubería de producción (**Figura 6.4**).

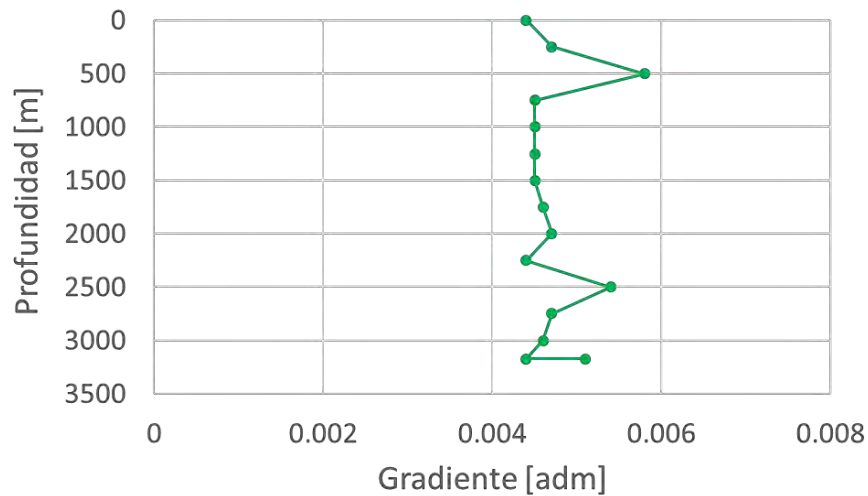


Figura 6.4 Gradiente de presión en el pozo “A”

Mediante un registro con ecómetro se detectó un nivel de líquido a 2109 m en el pozo “A” (**Figura 6.5**). Esta condición representa una columna de líquidos de 1020 m sobre el émbolo y 1078 m sobre el nivel medio de los disparos. Sin embargo, no se considera representativo por las siguientes razones:

1. El gradiente medido dentro del pozo no concuerda con la estimación del nivel de líquido. La carga hidrostática equivale a una presión de 102 kg/cm² sobre el émbolo y 107.6 kg/cm² al nivel medio disparado. Esta condición representa 35 kg/cm² adicionales a la presión medida en el registro estático y no concuerda con la tendencia de presión del yacimiento
2. La columna de líquido estimada con el registro del ecómetro equivale a una producción de 30.7 barriles por ciclo. Este valor no concuerda con la producción reportada en el pozo. En promedio se estima una producción de líquido de 12 bpd.

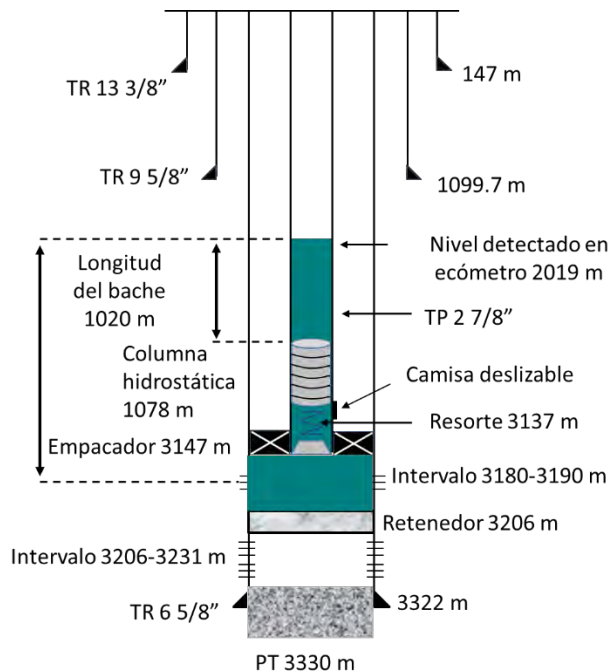


Figura 6.5 Nivel detectado en el registro ecómetro

Mediante la implementación del sistema émbolo viajero en el pozo “A” se logró reincorporar el pozo a producción, obteniéndose una plataforma estable de producción de 0.22 MMpcd de gas húmedo y 12 bpd de agua (**Figura 6.6**). De acuerdo al último aforo disponible del 01 de mayo de 2017, el pozo produce 0.265 MMpcd de gas y 11 bpd de agua, equivalentes a una relación gas-líquido de 4291 m³/m³.

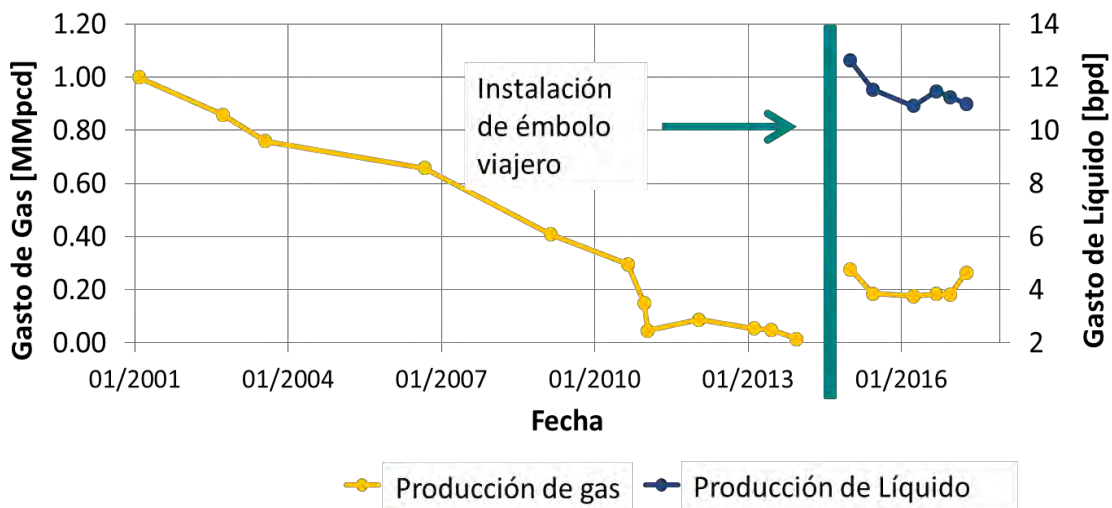


Figura 6.6 Producción de gas y líquido del pozo “A”

6.2.2 Condiciones actuales de operación

La forma convencional de evaluar la operación del sistema del émbolo viajero es mediante gráficas L-10, instaladas en un registrador de presión, en las que se puede observar las variaciones en la presión en la cabeza del pozo durante un periodo de 24 horas. Con la evolución de la tecnología, actualmente se dispone de dispositivos capaces de registrar la presión en forma digital por periodos mayores de tiempo. Tanto en los registros digitales como en las gráficas es posible identificar los periodos de flujo, así como las diferentes etapas del ciclo de operación del sistema.

Los diez pozos que operan con sistema de émbolo viajero en el campo analizado, tienen instalados registradores digitales que almacenan los datos instantáneos de la presión en cabeza y en la bajante. La información se descarga como archivos de texto plano o de Excel. En la **Figura 6.7** se muestra la información de operación del émbolo viajero del pozo "A", del 15 al 18 de marzo 2017.

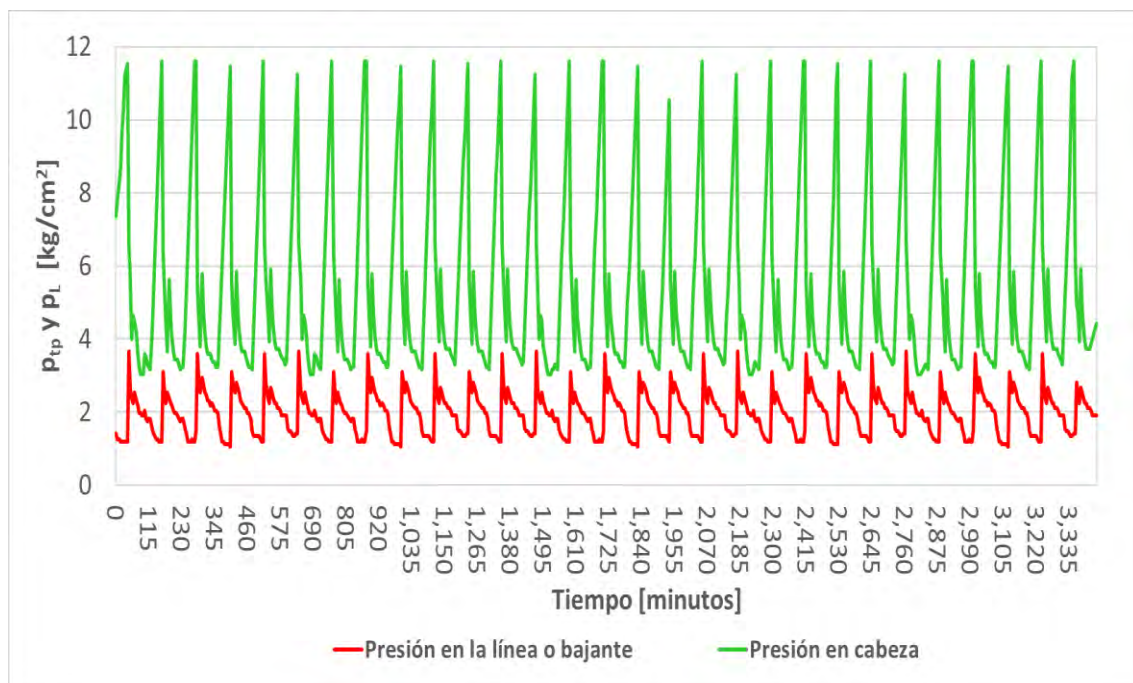


Figura 6.7 Comportamiento de presiones en cabeza y bajante del pozo "A"

El registrador de la presión en el pozo “A” está calibrado para capturar los datos de presión cada 5 minutos y 26 segundos. Cabe mencionar que es posible modificar la frecuencia de adquisición; sin embargo, por cuestiones de almacenamiento y tiempos de recuperación de la información, se ha estandarizado este valor por el personal de operación de pozos.

Los datos de presión en la cabeza y de presión en la bajante registrados durante un periodo de 24 horas en el pozo “A”, se presentan en la **Figura 6.8**. Como puede observarse, el sistema de émbolo viajero está diseñado para efectuar un promedio de 13 ciclos por día; cada uno tiene una duración aproximada de dos horas y 5 minutos (125 minutos), como se muestra en la **Figura 6.9**.

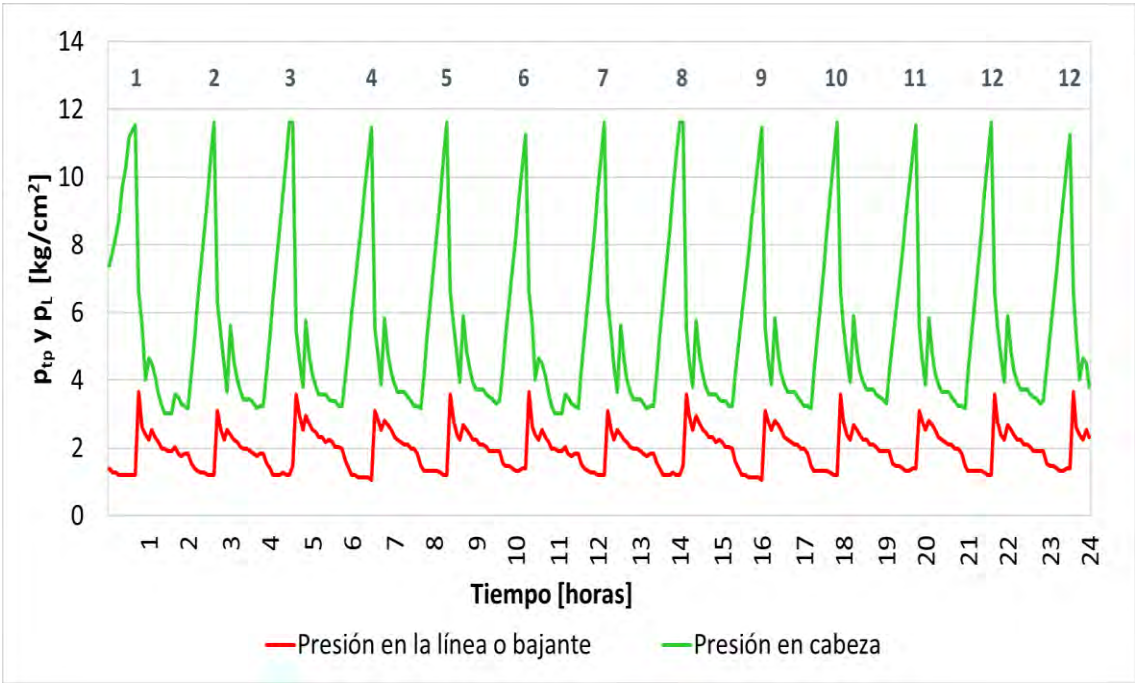


Figura 6.8 Número de ciclos en 24 horas

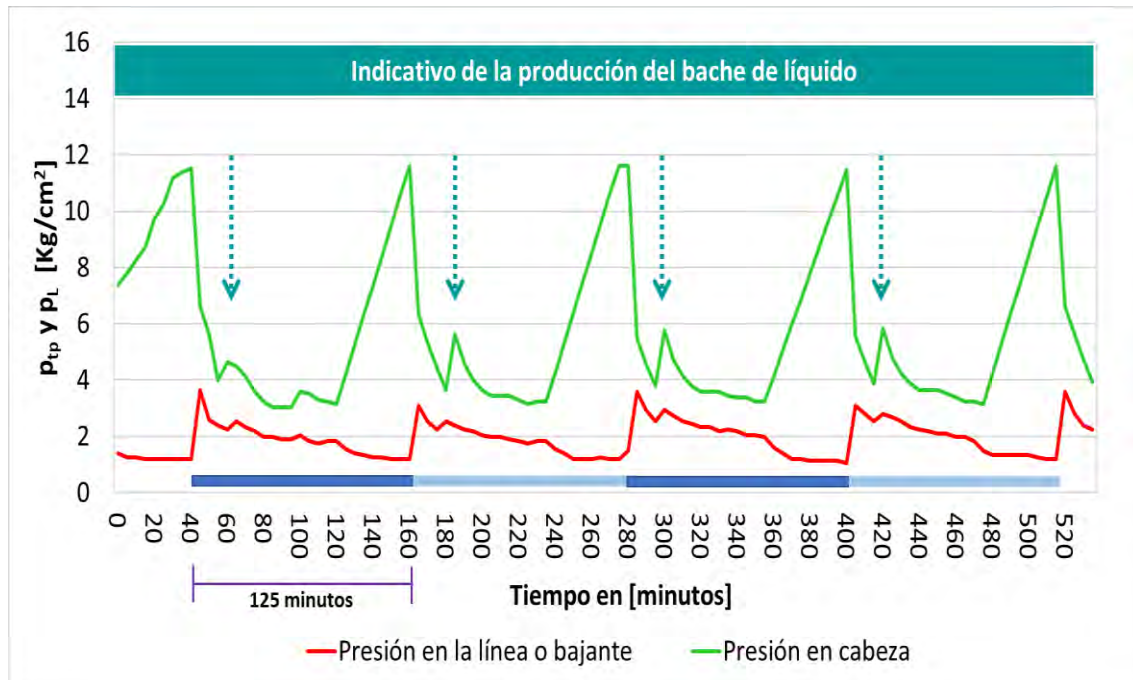


Figura 6.9 Tiempo de duración un ciclo y producción del bache

En cada uno de los ciclos de operación del sistema pueden diferenciarse las cuatro etapas descritas en el capítulo dos: presurización del sistema, carrera ascendente, purga de gas, y carrera descendente, como se indica en la **Figura 6.10**. Con base en los datos disponibles, el tiempo promedio de duración de cada etapa es el siguiente:

- Presurización del sistema: 40 minutos
- Carrera ascendente: 20 minutos
- Producción del bache: 5 minutos
- Purga de gas y carrera descendente: 1 hora

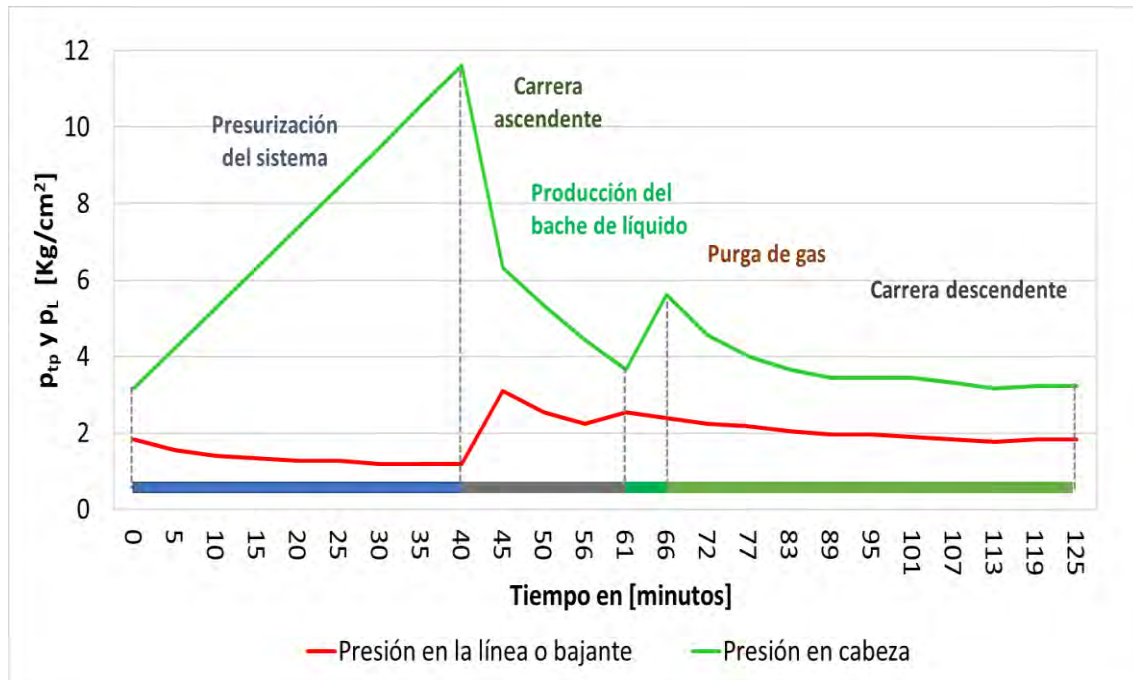


Figura 6.10 Duración del ciclo de operación del émbolo viajero

Considerando los datos de operación e información disponible, la configuración mecánica del pozo, y las características de acumulación de agua en el fondo, se seleccionó el pozo "A" para validar el modelo desarrollado y estudiar la hidrodinámica de la operación de los sistemas de émbolo viajero.

Capítulo 7

Validación y discusión de resultados

En este capítulo se presenta la validación del modelo matemático propuesto para describir los aspectos hidrodinámicos principales del flujo durante la operación de los sistemas de émbolo viajero. Para tal efecto, se utilizará la información del pozo “A”, descrito en el capítulo 6.

En las secciones siguientes se describe el modelo de simulación desarrollado en la herramienta computacional presentada en el capítulo 5, y se discuten los resultados de las simulaciones realizadas. Finalmente, se presenta una discusión de la evaluación estadística del modelo.

7.1 Modelo de simulación

Con base en la información del sistema analizado presentada en el capítulo 6, se generó un modelo de simulación en la herramienta desarrollada. La información de entrada requerida por el programa de cómputo se muestra en la **Tabla 7.1**.

Tabla 7.1 Datos de entrada

Parámetro	Valor	Unidad
Profundidad tope localizador	3,147	m
Diámetro TP interior	2.441	pg
Diámetro TP exterior	2 7/8	pg
Diámetro TR interior	5.791	pg
Diámetro TP exterior	6 5/8	pg
Densidad del líquido	10	API
Densidad relativa del gas (γ_g)	0.631	Adm
Pesos del émbolo (W-émbolo)	2.0	lb
Longitud del émbolo (LE)	0.46391	m
Longitud del bache (LB)	48	m
Temperatura en superficie	34	°C
Temperatura en fondo	88.19	°C
Diámetro de estrangulador	40	64 ^{avo} pg

Presión estática	70.27	kg/cm ²
Nivel Medio Disparado (NMD)	3,185	m
Presión de la línea	3	kg/cm ²

A partir de datos de aforo se determinó el tamaño del bache de líquido aportado en cada ciclo de operación del sistema de émbolo viajero. El volumen promedio de agua desalojado por el pozo “A” es de 0.91 barriles por ciclo y corresponde a una longitud del bache de 48.23 metros, con una producción de gas del orden de 22,083 pies³ (623.3 m³).

En la **Figura 7.1** se muestra la curva de comportamiento de afluencia del pozo “A”, calculada con la ecuación Rawlins and Schellhardt (ec. 4.17), a partir de datos de un aforo y de un prueba de presión realizada en un pozo vecino. El exponente de flujo “*n*” y el coeficiente de flujo “*C*” requeridos en la Ec. 4.17 se indican en la **Tabla 7.2**.

Tabla 7.2 Exponente y coeficiente de flujo

Parámetro	Valor	Unidad
n	0.53	adim
C	1.12E-04	MMpcd/psi ²

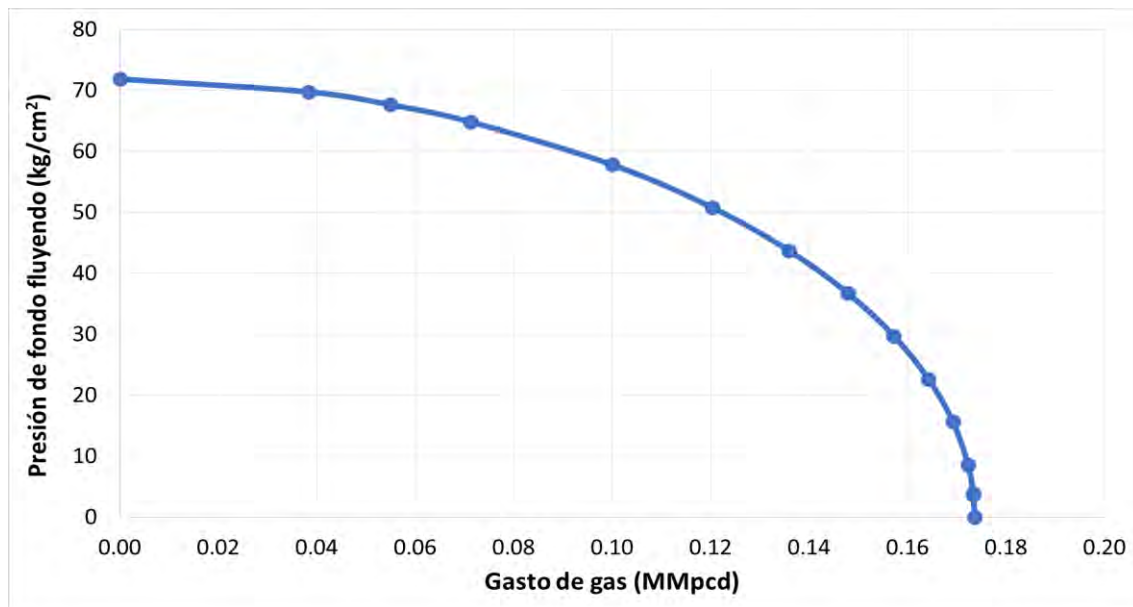


Figura 7.1 Curva de comportamiento de afluencia

7.1.1 Condiciones iniciales y de frontera

Las condiciones iniciales utilizadas en las simulaciones se indican en la **Tabla 7.3**. Se considera que inicialmente el émbolo se encuentra estático en el fondo del pozo.

Tabla 7.3 Condiciones iniciales

Parámetro	Valor	Unidad
Velocidad del émbolo	0	m/s
Posición del émbolo (L_{bE})	0	m
Presión en cabeza (p_{tp})	11.60	kg/cm ²

Como condiciones de frontera se especifican la presión en la línea de descarga y la presión del yacimiento (**Tabla 7.4**).

Tabla 7.4 Condiciones de frontera

Parámetro	Valor	Unidad
Presión de la línea	2.8	kg/cm ²
Presión de yacimiento	70.27	kg/cm ²

7.2 Resultados

Se realizó la simulación de seis ciclos de operación del pozo “A” con el sistema de émbolo viajero, incluyendo un periodo de arranque. El tiempo de cómputo fue de cinco minutos aproximadamente para la simulación de 14 horas y 17 minutos de operación, en una computadora con procesador Intel Core i7 a 2.80 GHz con 6 GB de memoria en RAM. En las simulaciones se utilizó un paso de tiempo de 0.001 segundos; los resultados se imprimen en intervalos de un segundo, los cuales, se presentan y discuten a continuación.

7.2.1 Condiciones de arranque

También llamada condición de puesta en operación del modelo, recibe este nombre porque la simulación parte de una condición de equilibrio hidrostático en el sistema. Este comportamiento se puede interpretar como el estado del pozo posterior a un periodo de cierre prolongando.

En la **Figura 7.2** se muestra en color azul el comportamiento de la presión en la cabeza y en color café la presión en el fondo al momento de abrir el pozo al tiempo cero. El valor de la presión en cabeza se estimó en 54.2 kg/cm² mediante el cálculo del gradiente hidrostático en fase gas y el dato de presión estática en el fondo. La

condición de arranque tiene una duración de aproximadamente 1,000 segundos y representa la despresurización de tubería de producción al momento de abrir el pozo. A partir de este tiempo, se establecen las condiciones iniciales para la simulación de los ciclos de operación del sistema.

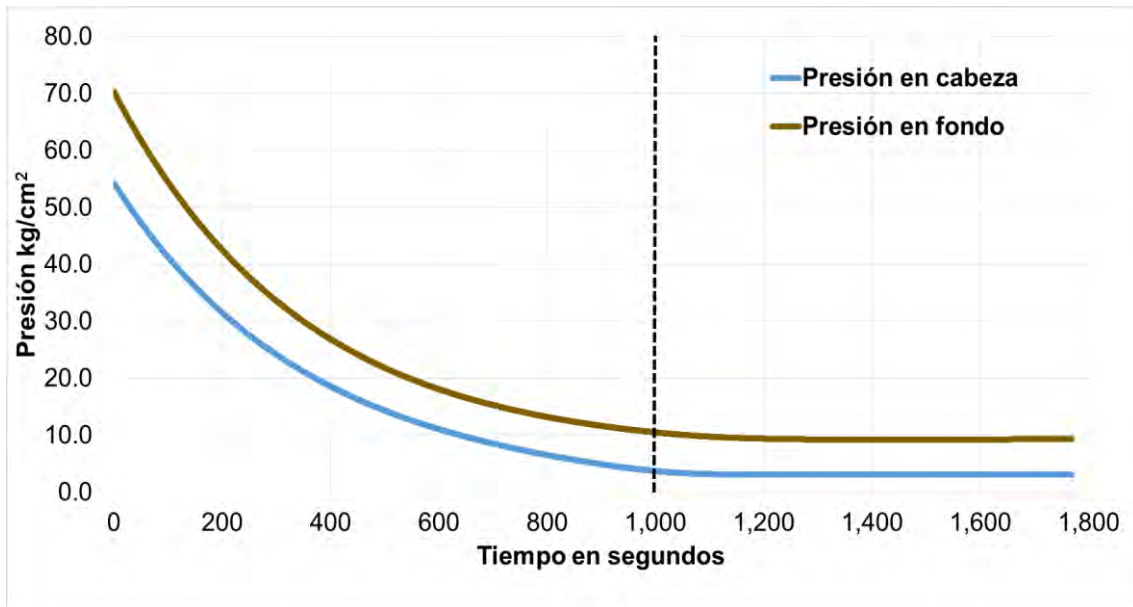


Figura 7.2 Predicción del arranque del pozo “A”

7.2.2 Comportamiento de presión en la cabeza

El comportamiento de la presión calculada en la cabeza del pozo durante la operación del sistema del émbolo viajero se muestra en la **Figura 7.3**. En esta Figura se indican las etapas características de los ciclos de acuerdo a los resultados de la simulación.

Como puede observarse en la **Figura 7.4**, la duración calculada de cada ciclo de operación es 2 horas y 5 minutos; las presiones máximas en la cabeza del pozo durante la presurización y la producción del bache son 11.6 kg/cm² y 8.3 kg/cm², respectivamente.

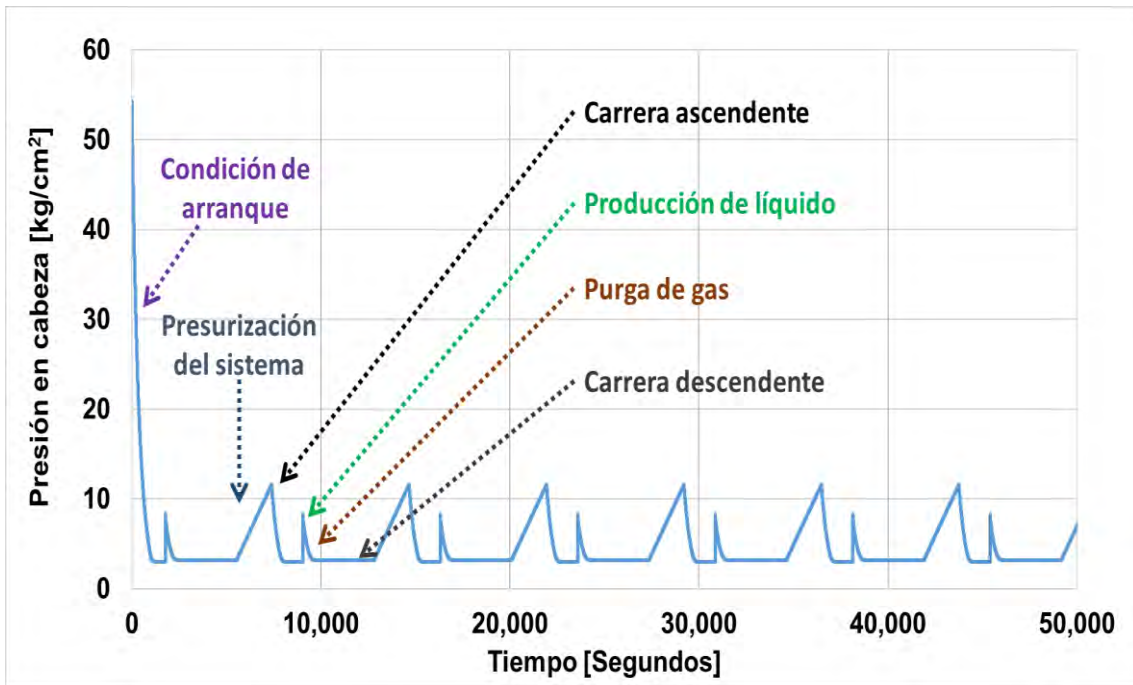


Figura 7.3 Predicción del comportamiento de presión en cabeza

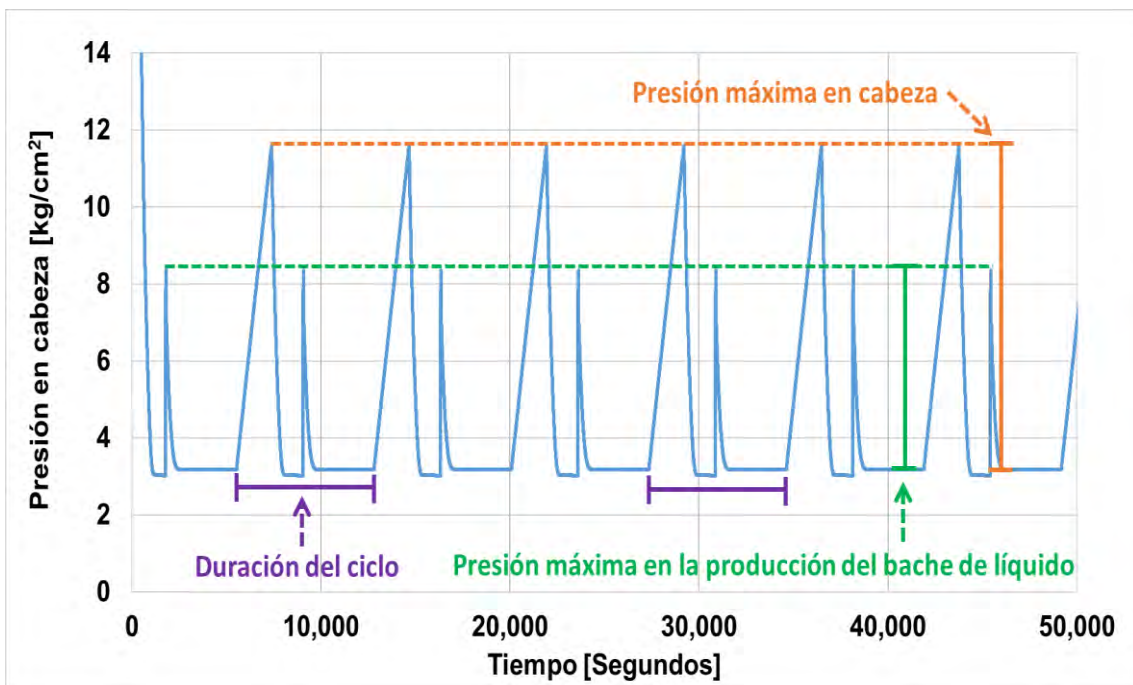


Figura 7.4 Simetría entre los ciclos simulados

7.2.3 Velocidad y posición

Por medio del programa de cómputo es posible monitorear la posición y la velocidad de ascenso del émbolo y el bache de líquido, como se muestra en la **Figura 7.5**. La línea verde corresponde a la velocidad del émbolo y la línea roja indica su posición.

Como puede observarse en la Figura 7.5, la velocidad del émbolo se incrementa hasta alcanzar un máximo de 2.57 m/s, cuando ha recorrido poco más de un tercio de la longitud total del pozo; posteriormente, disminuye hasta un valor de 1.85 m/s; una vez que el frente del bache llega a la superficie (aproximadamente a los 1,800 segundos), el émbolo se acelera debido a que el volumen del bache disminuye conforme entra a la línea de descarga. Cuando el émbolo llega a la superficie queda alojado en el lubricador.

Es importante destacar que el valor de la velocidad promedio de ascenso calculada (1.7 m/s), es consistente con lo reportado por Mower y Lea (1985), para la velocidad mínima de operación (1.27 m/s).

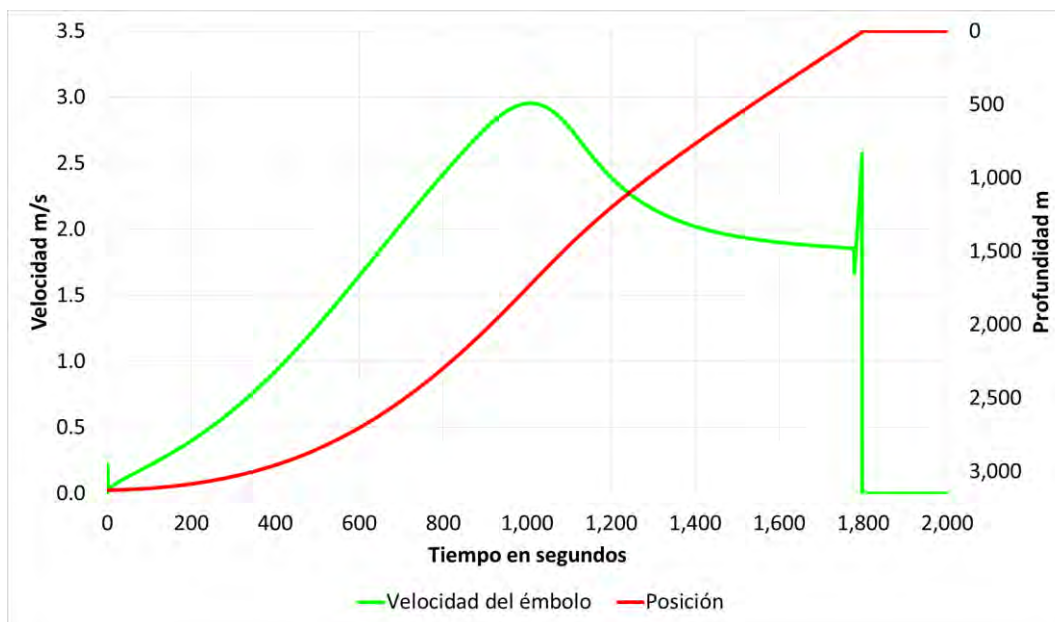


Figura 7.5 Perfil de velocidad de ascenso del émbolo y bache de líquido

En la **Figura 7.6** se muestra el comportamiento de la velocidad y posición del émbolo viajero durante tres ciclos. Se pueden observar cuatro zonas de colores: la verde representa la carrera ascendente y producción del bache; la roja enmarca el periodo de producción de gas; la amarilla corresponde a la carrera descendente; y la azul representa la presurización de la TP. Esta Figura permite verificar la consistencia de los resultados obtenidos:

1. El émbolo queda alojado en el lubricador mientras se produce el gas (zona roja). Por otra parte, permanece en el fondo en tanto se presuriza la TP durante el periodo de cierre en la superficie (zona azul).
2. En la etapa ascendente (zona verde) el émbolo presentará movimiento hacia la superficie desarrollando un perfil de velocidad. En la carrera descendente (zona amarilla), el émbolo cae al fondo del pozo a una velocidad constante, dependiente del tipo de fluido que atraviesa.

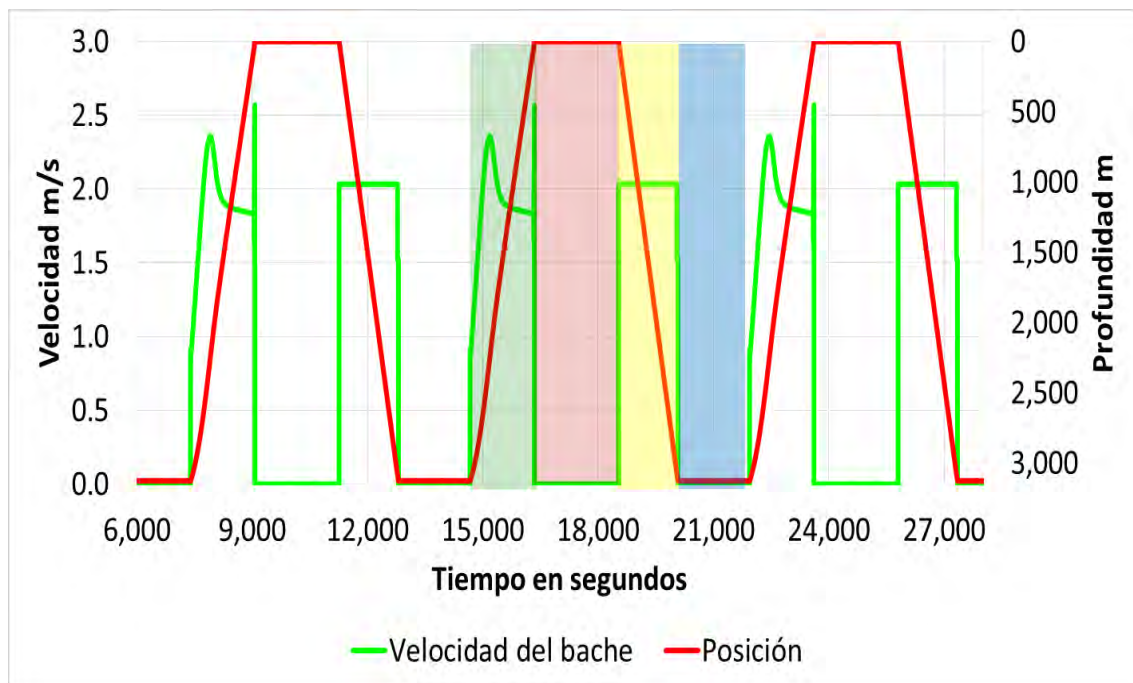


Figura 7.6 Comportamiento de la velocidad y posición del émbolo viajero

7.2.4 Comportamiento de la presión en el fondo del pozo

Mediante el modelo es posible analizar el comportamiento de presión debajo del émbolo viajero (**Figura 7.7**). La presión debajo del bache y la presión de fondo fluyendo se calcularon a partir del gradiente hidrostático y la solución de la Ec. 4.6.

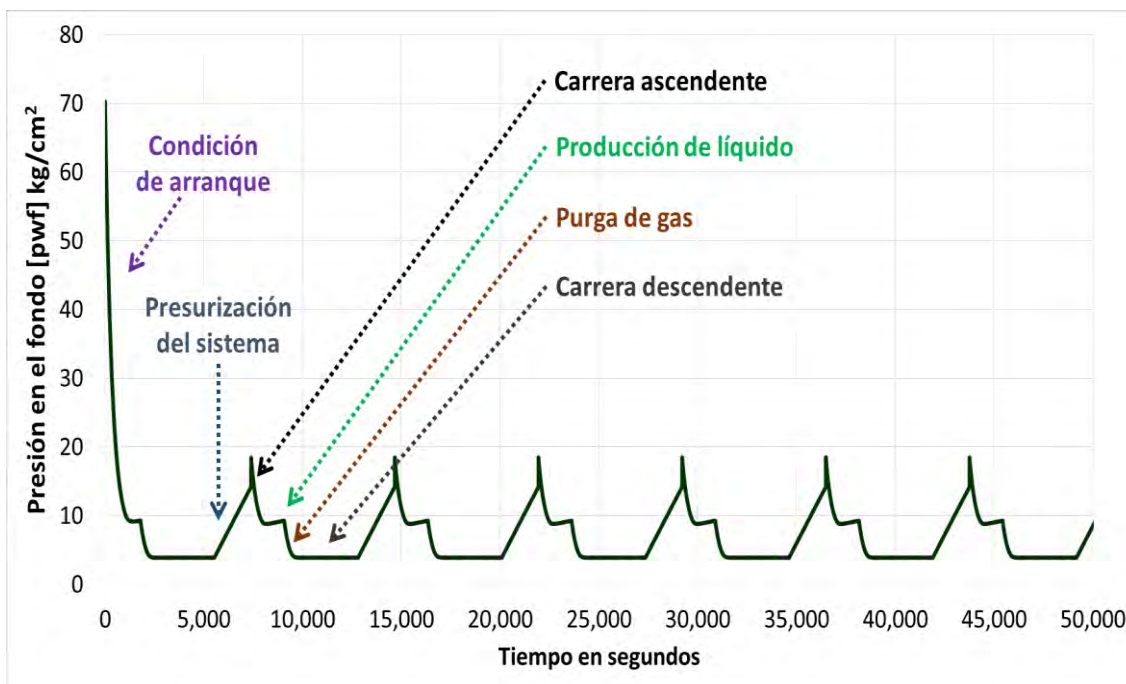


Figura 7.7 Comportamiento de la presión debajo del émbolo

7.2.5 Aporte de gas del yacimiento

El perfil del comportamiento de la presión de fondo fluyendo se utiliza para calcular la entrada de gas en el fondo del pozo. En la **Figura 7.8** se muestran la variación instantánea del gasto volumétrico de gas aportado del yacimiento. Como puede observarse, durante toda la operación de sistema émbolo viajero existe entrada de gas.

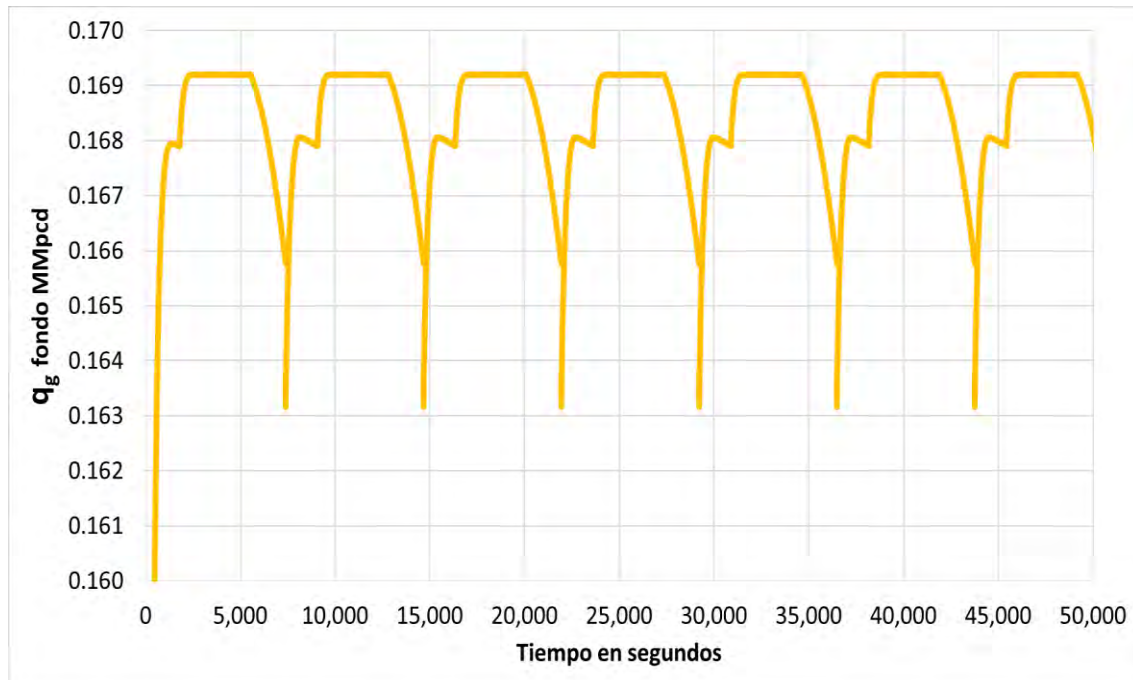


Figura 7.8 Aportación de gas del yacimiento

7.2.6 Producción de gas en la superficie

El comportamiento del gasto de gas en la superficie está relacionado con las etapas de operación del sistema émbolo viajero. En la **Figura 7.9** se ilustra la respuesta del simulador para cada etapa del ciclo de operación.

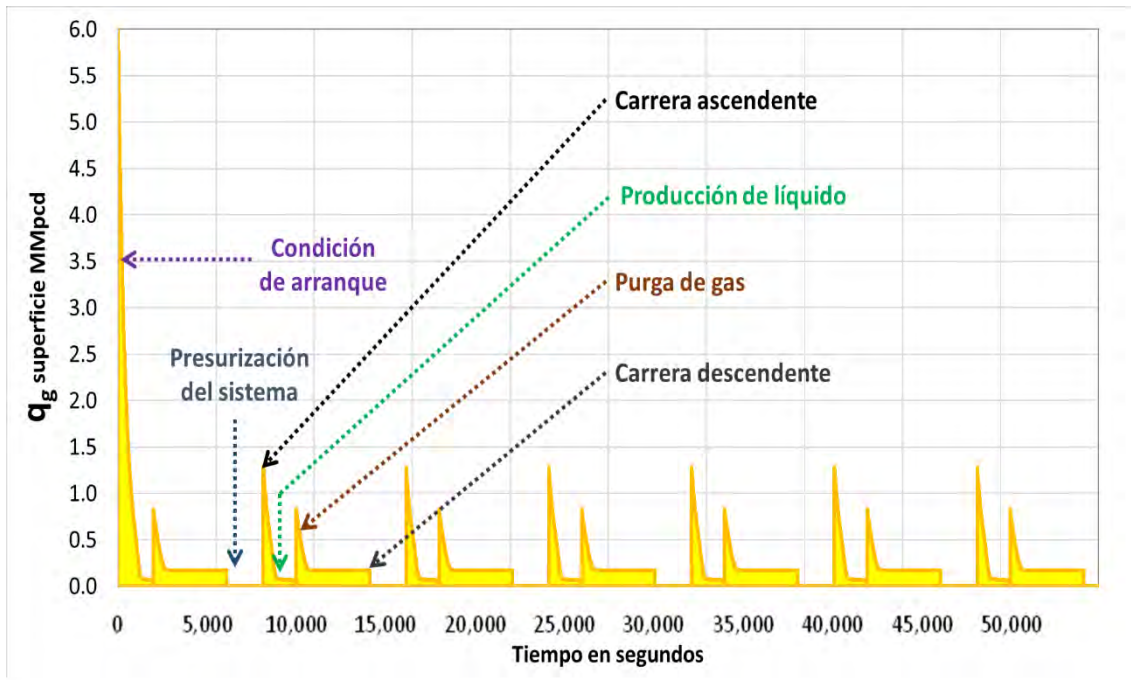


Figura 7.9 Producción de gas en superficie

7.2.7 Producción del bache

En la **Figura 7.10** se muestran las variaciones instantáneas de la longitud y velocidad del bache, así como de la presión en la cabeza, durante la etapa de producción del bache. Como puede observarse, la reducción del volumen de líquido en el aparato de producción provoca un incremento en la velocidad de ascenso del émbolo (línea verde) de 1.85 a 2.57 m/s, y un aumento en la presión en cabeza de 3 a 8.3 kg/cm² (línea azul).

Con respecto al tiempo de producción del bache, éste fue de aproximadamente 26 segundos (área verde de la Figura 7.10). Es importante mencionar que este resultado es consistente con lo reportado por Chava, Falcone y Teodoriu en 2008, quienes reportaron valores característicos de 60 y 30 segundos.

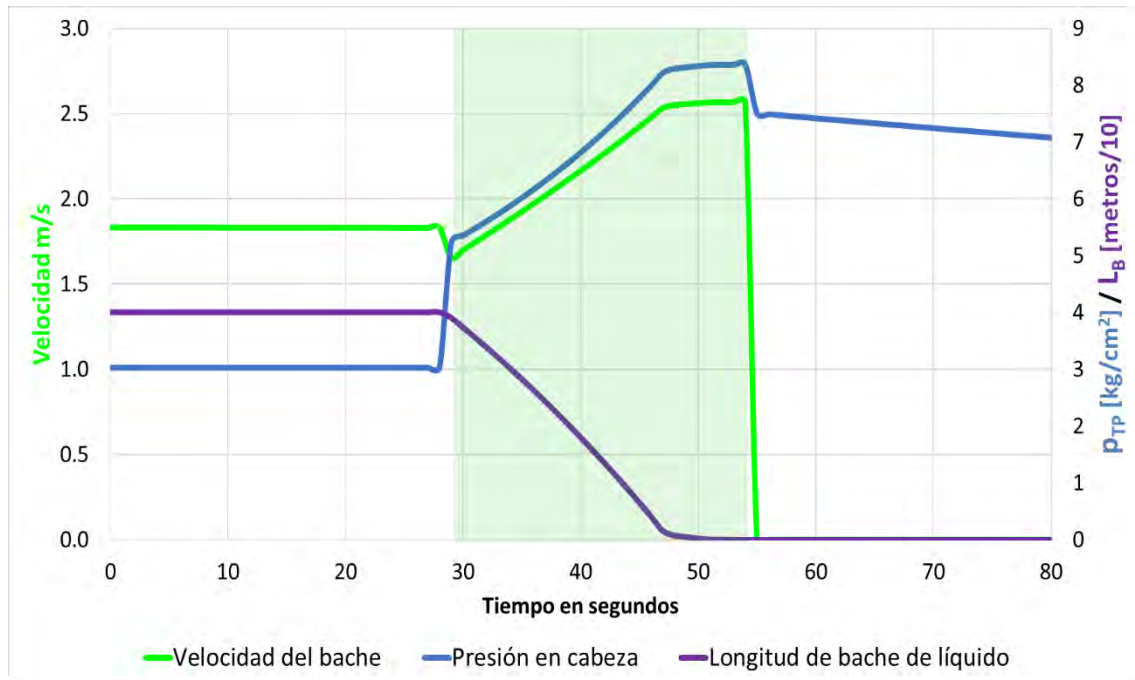


Figura 7.10 Efecto de la producción del bache de líquido

En la **Figura 7.11** se destacan los periodos correspondientes a la producción de los baches de líquido en los seis ciclos de operación simulados.

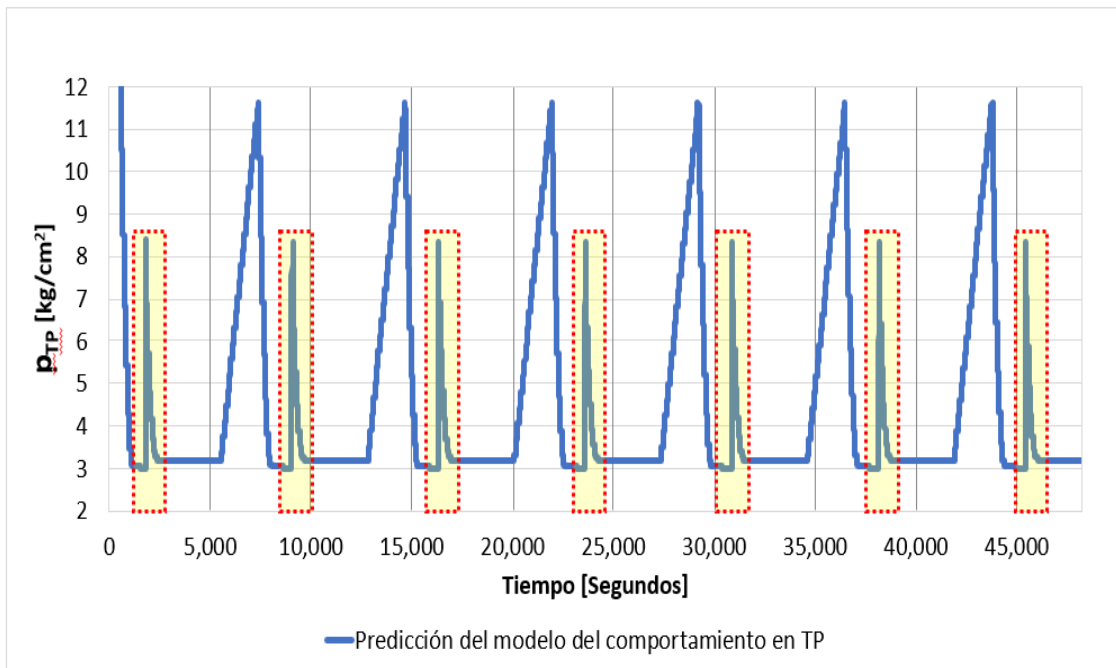


Figura 7.11 Predicción de la producción del bache de líquidos

7.3 Validación

La validación del modelo desarrollado se realizó con base en los datos medidos durante la operación del pozo “A”, presentados en el capítulo 6. A continuación se presentan y discuten los resultados de las evaluaciones estadísticas realizadas.

7.3.1 Comparación de resultados con datos medidos

En la **Figura 7.12** se muestra la comparación del comportamiento de la presión en la cabeza durante la operación del sistema émbolo viajero del pozo “A” y la predicción del modelo propuesto. Las curvas verde y roja corresponden a los datos de las presiones en la cabeza y la línea de descarga, respectivamente. Los respectivos valores calculados se indican con la línea azul y negra. Debe observarse que en las simulaciones realizadas se utilizó un valor constante de la presión en la línea de descarga (2.8 kg/cm^2).

Como puede observarse en la Figura 7.12, existe un buen acuerdo de los resultados calculados con respecto a los datos medidos. El modelo reproduce bien la duración total de los ciclos, así como la amplitud y frecuencia de las oscilaciones de la presión en la cabeza, durante las etapas de presurización y la carrera ascendente. Por otra parte, subestima la duración de la etapa de producción del bache y se sobrestima la presión máxima en la cabeza en esta etapa.

Con respecto a lo anterior, es importante resaltar que el periodo de toma de información en campo con el registrador de la presión en la cabeza del pozo “A”, fue de 5 minutos. Considerando que el tiempo de producción del bache reportado por personal de operación es del orden de 30 segundos (y de manera consistente con los resultados de las simulaciones realizadas: 26 segundos), entonces puede existir una incertidumbre considerable en los datos medidos durante estas etapas del ciclo.

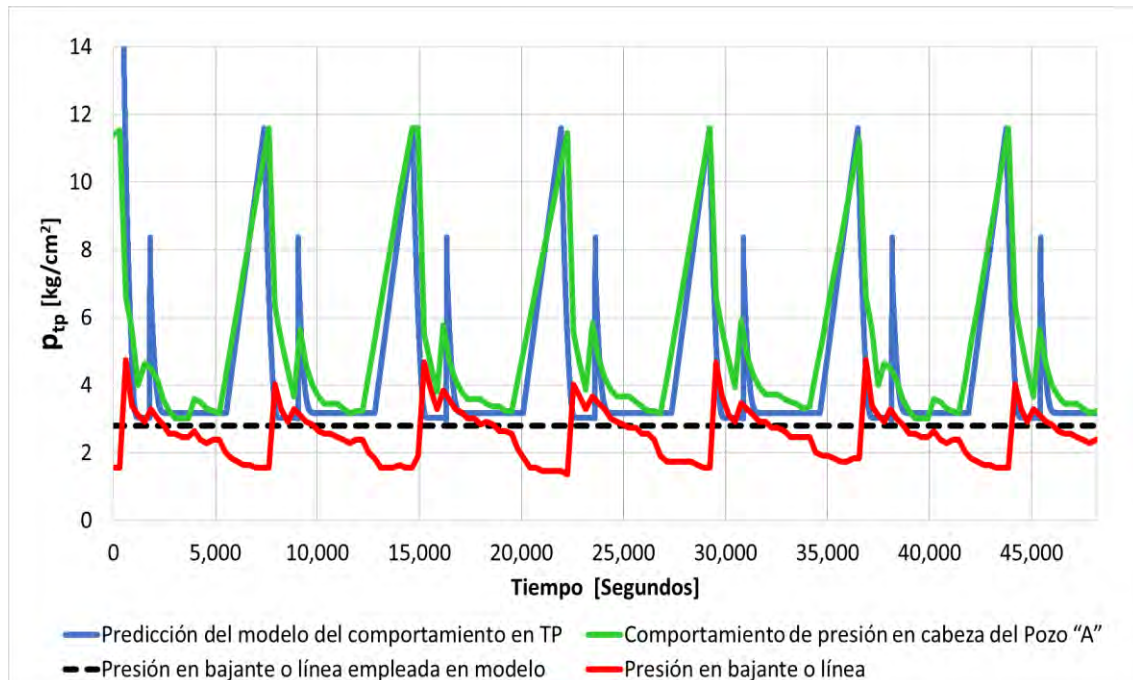


Figura 7.12 Relación entre presión en la línea o bajante y presión en cabeza

En la **Figura 7.13** se compara el comportamiento de la presión en la cabeza calculada (línea azul) durante las cuatro etapas características de un ciclo de operación, con respecto a los valores medidos (línea verde). Las diferencias que se observan entre las pendientes pueden atribuirse al índice de productividad; conforme este aumenta, la pendiente de la curva calculada se incrementa y se reduce el tiempo requerido en esta etapa. Un efecto similar se obtiene al reducir el diámetro de la tubería de producción.

Con relación a la carrera ascendente, se puede destacar que las pendientes son muy similares hasta los 7,900 segundos. Sin embargo, existe un desfase de 263 segundos entre la predicción y el dato de campo al inicio de esta etapa. Esto se atribuye al valor del índice de productividad empleado en el modelo. La diferencia de comportamiento entre 7,900 y 8,800 segundos es resultado de la presión en línea de producción.

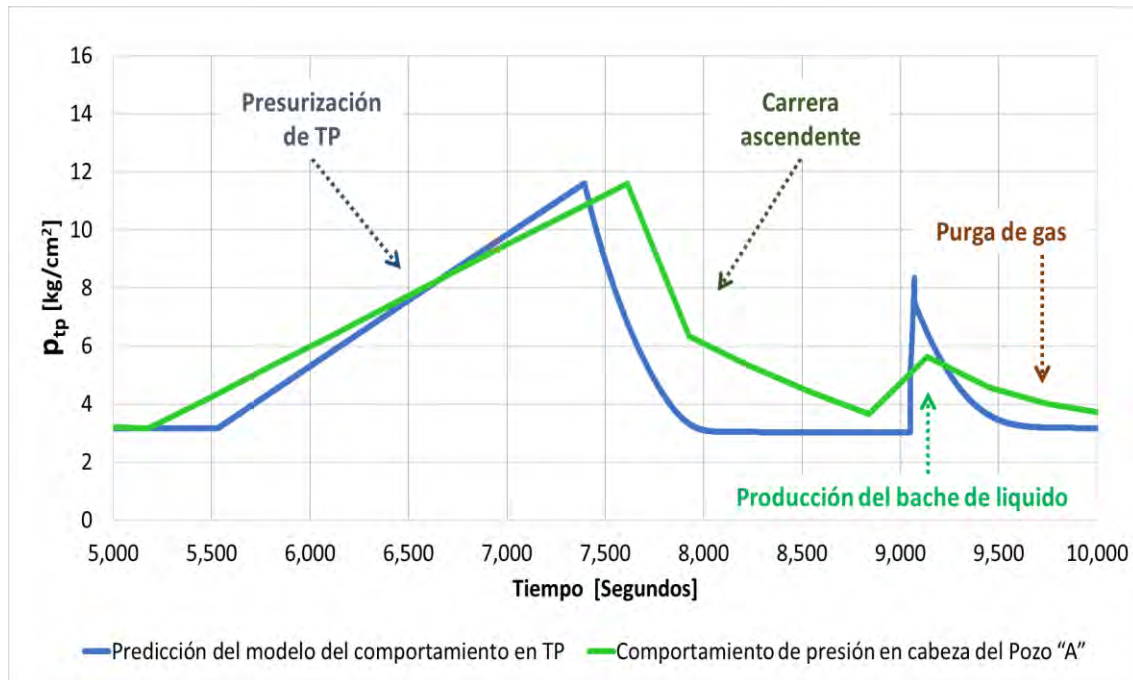


Figura 7.13 Comparativa de ciclo del émbolo viajero

Con respecto a la producción de gas, mediante el modelo es posible calcular el volumen producido en cada ciclo y compararlo con la medición del pozo. En un periodo de 24 horas se presentan 12 ciclos. Con base en los resultados de la simulación (Figura 7.9), el gasto promedio de gas por día es de 0.245 MMpcd. Este resultado es consistente con los datos de campo, pues se reportó una producción de 0.265 MMpcd de gas. El error relativo correspondiente del modelo es de 7.5%. Este resultado es aceptable al considerar que el comportamiento de afluencia utilizado corresponde a un pozo de correlación.

7.3.2 Evaluación estadística

Como se mencionó en secciones anteriores, los datos medidos de presión en cabeza se obtuvieron en intervalos de tiempo de cinco minutos (300 segundos), mientras que los resultados del modelo se presentan cada segundo. Con el objetivo de comparar la misma cantidad de datos medidos y simulados, se extrajeron resultados de la simulación cada 300 segundos durante seis ciclos completos, obteniéndose un total de 169 datos de presión en la cabeza del pozo. Cabe mencionar que se consideraron seis ciclos, con el objetivo de incrementar el tamaño de la muestra y disminuir el efecto de las variaciones instantáneas de la presión medida entre ciclo y ciclo. En la **Figura 7.14** se muestran los datos utilizados en la evaluación estadística.

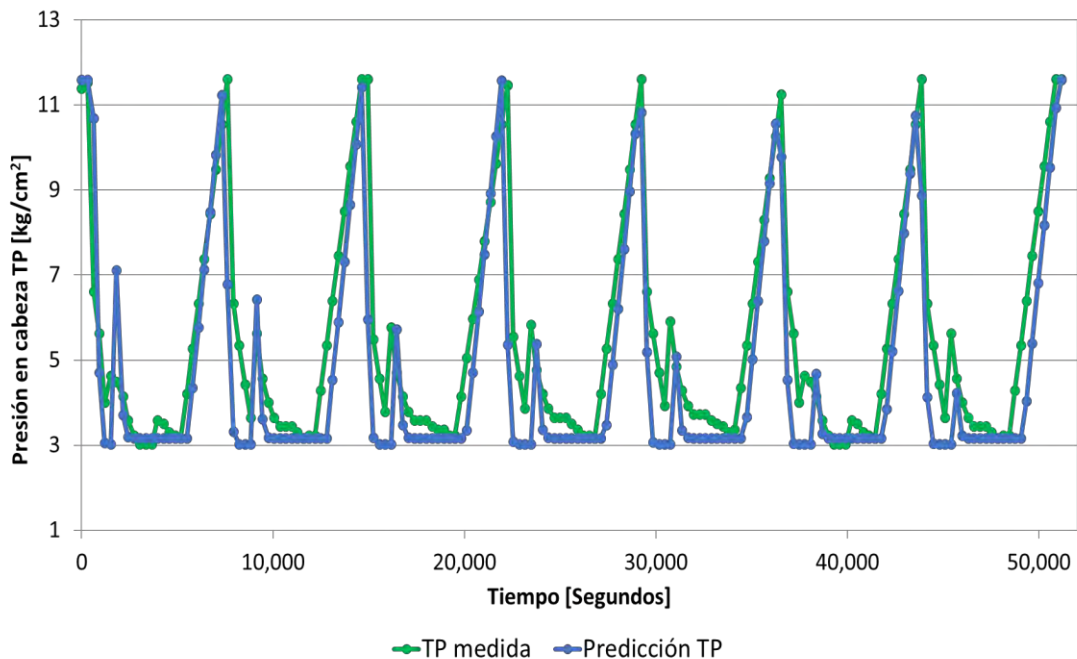


Figura 7.14 Predicción en intervalos de tiempo de 300 segundos

a) Media y desviación estándar de los conjuntos de datos

Para efecto de comparación, se calculó la media y la desviación estándar del conjunto de datos medidos de presión en la cabeza, así como del conjunto de datos calculados. Los resultados obtenidos se presentan en la **Tabla 7.5**. Como puede observarse existe una buena correspondencia entre el comportamiento de los datos calculados y el de los datos medidos. Esto indica que el modelo reproduce de manera adecuada las variaciones instantáneas de la presión en la cabeza durante los ciclos de operación, ya que predice un valor similar para la presión promedio y la misma desviación estándar que el conjunto de los datos medidos.

Tabla 7.5 Media y desviación estándar dato medido vs predicción

Variable	Presión en la cabeza (kg/cm ²)	
	Medido	Calculado
Media	5.5	4.7
Desviación estándar	2.6	2.6

b) Media y desviación estándar del error relativo

Con base en el conjunto de datos medidos de presión en la cabeza del pozo, se calcularon los errores absoluto y relativo de los resultados de la simulación, y sus correspondientes desviaciones estándar, obteniéndose los resultados siguientes:

- Error absoluto: 0.844 kg/cm²
- Desviación estándar del error absoluto: 0.767 kg/cm²
- Error relativo: 15.6%
- Desviación estándar del error relativo: 13.3 %

Considerando las simplificaciones del modelo y la incertidumbre en los datos medidos, puede concluirse que existe un buen acuerdo entre las predicciones del

modelo y los datos medidos. Por lo tanto, el modelo hidrodinámico propuesto es válido para describir el comportamiento de las principales variables del sistema de émbolo viajero.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

En el trabajo presente se desarrolló un modelo matemático transitorio que captura los mecanismos hidrodinámicos principales durante la operación del sistema de émbolo viajero en pozos de gas con acumulación de líquido en el fondo. Para tal efecto:

1. Se realizó una revisión exhaustiva de la literatura relacionada con el modelado, diseño y operación de los sistemas de émbolo viajero. Se determinó que la mayoría de los métodos de diseño y modelos existentes implican simplificaciones considerables que limitan su aplicación, siendo una de las más importantes que no incorporan el carácter de flujo transitorio inherente a la operación de este tipo de sistemas.
2. En el planteamiento del modelo hidrodinámico desarrollado el ciclo de operación está conformado por cuatro etapas, en cada una de las cuales se plantearon y resolvieron numéricamente las ecuaciones de conservación de materia y cantidad de movimiento en volúmenes de control característicos.
3. Se desarrolló una herramienta de cómputo en Excel VBA con base en el modelo desarrollado, que permite:
 - a. Estimar la duración del ciclo de operación y de cada una de sus etapas
 - b. Calcular las variaciones instantáneas de: presiones en la cabeza y en el fondo del pozo; velocidad y posición del émbolo; y requerimientos de gas.
 - c. Modelar la condición de arranque del sistema.

4. El modelo y los resultados de la herramienta computacional desarrollados, se validaron satisfactoriamente con base en datos de un pozo productor de gas húmedo, que presenta acumulación de agua, en un campo de México. El error relativo en la predicción de la presión en la cabeza fue de 15.6%, y del gasto promedio de gas por ciclo fue de 7%.
5. Una de las aportaciones principales de este trabajo radica en proveer un modelo y una herramienta computacional para diseñar, analizar y evaluar la operación de los sistemas de émbolo viajero, proporcionando flexibilidad para realizar sensibilidades a las variables de diseño y operación del sistema.

Recomendaciones

1. Continuar con la validación del modelo desarrollado a partir de información de otros pozos productores de gas, que presentan acumulación de líquidos en el fondo, y operan con émbolo viajero.
2. Incorporar un modelo de flujo multifásico para estudiar la hidrodinámica del flujo debajo del émbolo.
3. Introducir una ecuación de estado para la modelar la formación de condensados en el aparejo de producción.
4. Continuar con el desarrollo del modelo, considerando el efecto de la fricción del émbolo, el escurrimiento de líquido, y la reinyección de fluidos al yacimiento.

Referencias

Abercrombie B. 1980 *“Plunger Lift” in The Technology of Artificial Lift Methods*. Petroleum Publishing Co. Tulsa Oklahoma, Vol 2b, Pennwellbooks

Beeson, Knox, And Stoddard. 1955. *Plunger Lift Correlation Equations And Nomographs*, AIME.

<https://doi.org/10.2118/501-G>

Bello O.; Falcone G.; Xu J. y Scott S. 2011. *Performance Evaluation of a Plunger Assisted Intermittent Gas Lift System*. SPE 141251. SPE Production and Operations Symposium, 27-29 March, Oklahoma City, Oklahoma, USA

<https://doi.org/10.2118/141251-MS>

Bello O.; Falcone, G.; Xu J.; Scott, S. y Harrod J. 2011. *Evaluation of Liquid Loading in the Pinedale Field: Integration of Smart Plunger Data and Mechanistic Modeling*. SPE 141250. SPE Production and Operations Symposium, 27-29 March, Oklahoma City, Oklahoma, USA

<https://doi.org/10.2118/141250-MS>

Brill James P. y Mukherjee Hemanta. 1999. *Multiphase Flow in Wells*, Society of Petroleum Engineers, First Printing.

Brown, K. E. 1980 *The Technology of Artificial Lift Methods*. Petroleum Publishing Co. Tulsa Oklahoma, Vol 2a, Pennwellbooks

Brown, K. E. 1980 *The Technology of Artificial Lift Methods*. Petroleum Publishing Co. Tulsa Oklahoma, Vol 2b, Pennwellbooks

Brown, K. E. 1983 *The Technology of Artificial Lift Methods*. Petroleum Publishing Co. Tulsa Oklahoma, Vol 4, Pennwellbooks

Cengel Yunes A. y Cimbala John M. 2012. *Mecánica de Fluidos Fundamentos y Aplicaciones*. Mac Graw Hill 1ra edición.

Chacín, J.; Schmidt, Z. y Doty, D. 1994. *Modeling and Optimization of Plunger Lift Assisted Intermittent Gas Lift Installations*. SPE 23682. SPE Advanced Technology Series, Volume2, Issue 1, March 1994

<https://doi.org/10.2118/23682-PA>

Chacín, J.; Schmidt, Z. y Doty, D. 1994. *Modeling and Optimization of Plunger Lift Assisted Intermittent Gas Lift Installations*. SPE 23683. SPE Advanced Technology Series, Volume2, Issue 1, March 1994

<https://doi.org/10.2118/23683-PA>

Chava, G. K.; Falcone, G. y Teodoriu, C. 2008. *Development of a New Plunger-Lift Model Using Smart Plunger Data*. SPE 115934 MS. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 21-24 September, Denver, Colorado, USA

<https://doi.org/10.2118/115934-MS>

Chava, G. K.; Falcone, G. y Teodoriu, C. 2009. *Plunger Lift Modeling Towards Efficient Liquid Unloading in Gas Wells*. SPE 124515. *SPE Projects, Facilities & Construction*, Volume 5, Issue 1

<https://doi.org/10.2118/124515-MS>

Clegg J.D, Bucaram S.M. y Heln Jr. N.W. 1993. *Recommendations and Comparisons for Selecting Artificial-Lift Methods*. *Journal of Petroleum Technology*, Volume 45, Issue 12. Society of Petroleum Engineers. SPE-24834-PA.

<https://doi.org/10.2118/24834-PA>

Desheng Zhou y Hong Yuan. 2010. *A New Model for Predicting Gas-Well Liquid Loading*. *SPE Production & Operations*, Volume 25, Issue 2. SPE-120580-PA

<https://doi.org/10.2118/120580-PA>

Foss, D. L. y Gaul, R. B. 1965. *Plunger – Lift Performance Criteria With Operating Experience – Ventura Avenue Field*. *Drilling and Production Practices*, API.

Gasbarri, S. y Wiggins, M. L. A. 1997. *Dynamic Plunger Lift Model for Gas Wells*. *Journal of Petroleum Technology*, Volume 50, Issue 7. SPE 37422.

<https://doi.org/10.2118/37422-MS>

Lea, J. F. 1982. *Dynamic Analysis of Plunger Lift Operations*. *Journal of Petroleum Technology*, Volume 34, Issue 11, SPE-10253-PA

<https://doi.org/10.2118/10253-PA>

Marcano, L. y Chacín, J. 1992. *Mechanistic Design of Conventional Plunger-Lift Installation*. Intevep S.A., *SPE Advanced Technology Series*, Vol. 2, No. 1, SPE 23682.

<https://doi.org/10.2118/23682-PA>

Mower, L. W.; Lea, J. F.; Beauregard, E. y Ferguson, P. L. 1985. *Defining the Characteristics and Performance of Gas Lift Plungers*. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 22-26 September, Las Vegas, Nevada SPE 14344.

<https://doi.org/10.2118/14344-MS>

Navarro R. Rafael 1996. *Optimización y análisis de la aplicación del émbolo viajero*, Tesis de Licenciatura UNAM, México.

Tang, Y. y Liang, Z. A. 2008. *New Method of Plunger Lift Dynamic Analysis and Optimal Design for Gas Well Deliquification*. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 21-24 September, Denver, Colorado, USA. SPE 116764.
<https://doi.org/10.2118/116764-MS>

Téllez V. Iván J. 2012. *Nuevos modelos para el análisis del pistón viajero*, Tesis de Licenciatura UNAM, México.

Anexo I

Carga de líquidos

Esto ocurre cuando el gas natural fluye hacia la superficie desde los yacimientos presentando cambios en presión y temperatura, de manera que el gas forma precipitados como los condensados y agua condensada presente en la fase vapor, los cuales no son capaces de llegar hasta la cabeza del pozo debido a que no se cuenta con la energía suficiente.

Este fenómeno se caracteriza por un aumento en la presión de fondo fluyendo (p_{wf}) asociado al incremento de la saturación de líquidos en la vecindad del pozo. Lo que ocasiona una reducción de la permeabilidad efectiva del gas, por consecuencia una disminución de la velocidad y gasto. En este caso, si la producción de gas disminuye, se genera mayor acumulación de líquidos en el fondo del pozo, hasta el punto de perder totalmente la capacidad del pozo de fluir.

Las tecnologías que se han derivado en esta materia para la solución de los problemas que ocasiona la acumulación de líquidos en pozos de gas, se le conoce como remoción de líquidos en pozos de gas "Gas Well Deliquification". Uno de los controles más prácticos en la administración de la producción en estos pozos, es la "velocidad crítica" (v_{cg}) por debajo de la cual se forma la acumulación de líquidos en el fondo.

Turner et al. (1969) presentaron dos modelos mecánicos para estimar la velocidad crítica del gas, los cuales son ampliamente conocidos en la literatura y aplicados en la industria. Estos modelos se basaron en los aspectos siguientes:

- a) Modelo de una película o capa muy delgada de líquido presente en las paredes de la tubería.
- b) Modelo de una partícula esférica suspendida en el flujo de gas.

El que mejor se adapta a las condiciones de los pozos petroleros, es el modelo que describe el balance de fuerzas presentes en una partícula esférica de líquido, suspendida en un flujo de gas. De los estudios realizados por Turner se concluyó que cuando el flujo de gas excede la velocidad crítica, es capaz de levantar todas las partículas de líquidos presentes en el flujo y, por el contrario, cuando el flujo de gas es menor a la velocidad crítica, las partículas de líquidos caen en el fondo y se acumulan.

El problema de acumulación de líquidos también puede explicarse mediante el comportamiento de los patrones de flujo bifásico. Básicamente el cambio que ocurre de producir gas netamente al punto de acumularse los líquidos en el fondo del pozo, se conoce como transición del régimen de flujo anular al régimen de flujo tapón. El régimen de flujo se refiere a la configuración geométrica de la fase líquida y gaseosa, presente en la tubería de producción.

Taitel y col. (1980), presentó un trabajo para la predicción de los regímenes y patrones de flujo en pozos de gas, en el cual se describe que un pozo de gas debería mantenerse en el régimen de flujo anular, para remover o evitar la acumulación de líquidos en el fondo. En este caso, la velocidad superficial del gas debería ser mayor a la generada en la transición del flujo anular-tapón, para mantener el flujo anular.

La transición entre los regímenes de flujo anular y tapón derivados por Taitel y col., es la misma descrita por el modelo de la partícula suspendida en el flujo de gas presentado por Turner y col. En realidad, Taitel y col., siguieron este modelo cuya única diferencia entre ambos resulta en que el modelo de la partícula suspendida fue desarrollado en unidades americanas o "US units", y el modelo de Turner y col., se desarrolló en unidades internacionales o "SI units" (Montiel 2010).

Ambos modelos coinciden en que son independientes de la cantidad de líquidos presentes en el flujo de gas, lo que significa, que un pozo no tendría problemas de acumulación de líquidos en el fondo, mientras que la velocidad del gas sea mayor que la velocidad crítica o de la transición del flujo anular-tapón.

Se han desarrollado ciertas soluciones y establecidos en el caso de los pozos de gas para detectar, prevenir, remover o minimizar la producción de líquidos en el fondo del pozo. Estas alternativas se dividen en dos segmentos:

- a) Orientados a mantener la producción de gas superior a la velocidad crítica.
- b) Remoción de líquidos cuando la presión del yacimiento ha declinado.

El primer segmento tiene como objetivo mantener los líquidos suspendidos en el flujo de gas, mediante la instalación de sartas de velocidad, inyección de espuma en el pozo para reducir la densidad de la mezcla y técnicas de calentamiento intermitente del pozo para mantener los líquidos en suspensión en la fase gaseosa.

La remoción de líquidos se orienta principalmente a la instalación de métodos de levantamiento artificial conocidos en la industria, tales como el bombeo mecánico, inyección de gas y sistema de émbolo viajero.

La aplicación del sistema émbolo viajero puede extrapolarse al caso de los pozos de petróleo que fluye en forma natural, cuando la presión del yacimiento declina a lo largo de su vida productiva, y la energía natural no es lo suficiente para levantar o producir la producción líquida total (petróleo y agua) mejorando así la eficiencia de flujo.

Anexo II

Equipo superficial

Controlador de cabeza de pozo

Se dispone en el mercado de 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 émbolo, 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, aunque puede responder también a señales de sensores de nivel de líquido y arribo del émbolo a la superficie, entre otras. Estas unidades se conectan con el controlador de presiones y de tiempo para lograr un desempeño mejor.

Para controlar el tiempo es necesario un reloj de cuerda mecánica acoplado a un disco, que permita programar intervalos de tiempo o un sistema digital que permita enviar señales a la válvula motora accionada por un sistema neumático. El control por tiempo se utiliza principalmente en pozos que requieren un periodo de producción largo, por ejemplo, pozos con altas RGL, en los que, 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 émbolo llega al lubricador para desfogar un volumen extra de gas. En estas circunstancias es recomendable instalar un sensor de arribo del émbolo a la superficie.

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

El controlador de presión suele utilizarse en pozos cuyo volumen de gas no excede el volumen 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 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.

Válvula motora

Dispositivo mecánico colocado en la tubería de producción o bajante, diseñado con el fin de regular, permitir o impedir el flujo a lo largo de la tubería, de acuerdo con las necesidades del operador. Su operación neumática permite controlar la producción. Un ejemplo se tiene en la **figura A2.1** que muestra una válvula de alta presión MFC HP®, que permite presiones de operación de hasta $4,000 \text{ lb/pg}^2$.



Figura A2.1 Válvula motora

Lubricador

Es un elemento 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 émbolo, permitiendo 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 A2.2** muestra un lubricador normal que soporta presiones de trabajo de aproximadamente $2,000 \text{ lb/pg}^2$, pero existen lubricadores de alta presión que soportan hasta $3,500 \text{ lb/pg}^2$.



Figura A2.2 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 A2.3** muestra un resorte de fondo convencional, el cual requiere de un aditamento retenedor que le permita permanecer en el lugar que le corresponde. Este retenedor (tope localizador) 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 fluya 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 en condiciones en que está vacía, 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 fuertemente como para perjudicar la válvula de pie, provocando su mal funcionamiento. Todos estos elementos alojados dentro de la TP pueden recuperarse con línea de acero.



Figura A2.3 Resorte de Fondo

Émbolo

Dispositivo, generalmente metálico, cuya función principal es crear una interface mecánica entre el bache de líquido que se requiere producir y el gas impulsor, para incrementar la eficiencia de levantamiento de líquidos en una producción bifásica. Esta 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 A2.4** muestra un émbolo convencional.



Figura A2.4 Pistón o émbolo

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

impactos fuertes y continuos 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 se han desarrollado 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 con 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 émbolo 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 clasificación siguiente:

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, se somete a pasar por estos 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 se utilizan 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 reciben presión de 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 émbolo es que por su contacto continuo 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 émbolo 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 extraerse 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 émbolo está compuesto por una serie de hojas de acero inoxidable en la parte media del émbolo, que 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 eficiencia baja 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 desarrolladas para este 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 pueda implementarse. Uno de los desarrollos tecnológicos más nuevos es el émbolo inteligente.

Émbolo inteligente. 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 $15,000 \text{ lb/pg}^2$ con un error de 0.024% y temperaturas de hasta $150 \text{ }^\circ\text{C}$ con un error de 0.15%. La información registrada puede descargarse cada vez que el émbolo 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 émbolo, como son: los momentos en que el émbolo entra al líquido durante la carrea descendente y los momentos en que el émbolo llega a la superficie. Además, los datos recolectados por el émbolo pueden usarse en modelos dinámicos, para no asumir y/o despreciar elementos importantes en las ecuaciones involucradas en la descripción del movimiento del émbolo (Téllez 2012).