



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Automatización de cálculos  
para el diseño de sistemas de  
bombeo neumático**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Petrolero**

**P R E S E N T A**

Juan Cristóbal Coppel Trejo

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Teodoro Iván Guerrero Sarabia



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024**

*Dedico el presente trabajo*

*con todo mi amor a mi madre*

*Martha Celia Trejo Castillo*

## Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a mi mamá, **Martha Celia Trejo Castillo** por tu apoyo y amor incondicional durante toda mi vida, por guiarme en mis primeros pasos a las matemáticas e inculcarme siempre el valor del estudio, la cultura y el conocimiento.

A mi padre **Manuel Oscar Coppel Nakayama** y a mis abuelas, **Tomasa Pérez Montiel** y **Celia Castillo Pérez** por haberme enseñado desde niño que el lenguaje universal son las matemáticas.

A mi hermano **Miguel Oscar Coppel Trejo** por tu apoyo y confianza.

A **Yuleth Tatiana Narváez Barrios** por tu amor, paciencia, comprensión y apoyo en todas las vivencias que juntos hemos compartido.

A mi amigo y hermano de la Facultad de Ingeniería, **Oscar Peña Chaparro** por tu confianza, apoyo y motivación en la consecución de metas.

A mi profesora y amiga, **Fís. Claudia Salinas Chapa** por dejar en mí no sólo enseñanza académica sino de vida.

**M. C. Salvador Villalobos, Ing. Verónica Hikra García Casanova, Ing. Raúl Salinas Sánchez**, quienes además de ser mis profesores me brindaron su amistad.

Al **Dr. Rafael Rodríguez Nieto** y al **Dr. Fernando Samaniego Verduzco**, por su guía, apoyo y confianza, con mi admiración por ser ejemplos a seguir.

Al **Dr. Iván Guerrero Sarabia**, por su guía y consejos en la realización del presente trabajo.

A mis amigos **César Antonio Mendoza Galindo, José Alejandro González Urdiales, Rey David Gómez Barrios**.

A la **Universidad Nacional Autónoma de México** y la **Facultad de Ingeniería** por brindarme una formación profesional de excelencia y donde viví los momentos más felices de mi vida.

**“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”**

*“La natura stessa è un sistema dinamico di corpi in movimento, la cui struttura intelligibile può essere espressa matematicamente”*

*Galileo Galilei*

*“El proceso de aprendizaje implica el compromiso de llevarlo a cabo con el profesor, sin el profesor, y en ocasiones, a pesar del profesor”*

*Dr. Rafael Rodríguez Nieto*

*“Para ensinar aqueles que não sabem, para relembrar aqueles que sabem, e para corrigir aqueles que pensam que sabem”*

*Helio Gracie*

# Resumen

Conforme avanza el ciclo de vida de un yacimiento productor de petróleo y gas asociado, su presión declina ininterrumpidamente hasta que eventualmente es necesario aportarle energía al sistema para mantener la producción. A nivel de pozo, esto se realiza a través de los denominados sistemas artificiales, siendo el bombeo neumático (BN) uno de los más importantes. En términos generales, consiste en la inyección de gas en la sarta de producción a determinada profundidad con el objetivo de reducir la contrapresión en el fondo e incrementar el gasto de los fluidos de yacimiento. La inyección del gas puede realizarse de manera continua o intermitente.

Existen diversos métodos para diseñar los sistemas de BN que, en cualquiera de los casos, involucran cálculos complejos que demandan el uso de herramientas computacionales. En este contexto, el objetivo del presente trabajo es: *“Desarrollar un programa de cómputo que automatice cálculos relevantes para el diseño de sistemas de bombeo neumático continuo e intermitente”*.

En este documento se presentan antecedentes y conceptos relevantes sobre la operación de los sistemas de BN. Se abordan los tipos y mecánica de las válvulas de inyección. Para los sistemas de BN continuo, se explica el proceso de descarga de un pozo mediante la inyección de gas, así como los procedimientos para determinar la profundidad de colocación de las válvulas, dimensionar la válvula operante y calcular su presión de apertura. En cuanto al diseño de los sistemas de BN intermitente, se describen las etapas de un ciclo característico de operación y se presentan dos métodos de diseño utilizados en la industria. Posteriormente, se describe el programa de cómputo producto de este trabajo y se indica cómo se verificaron sus resultados. Finalmente, se presenta un estudio paramétrico con variables selectas de un sistema de BN.

# Abstract

As the life cycle of an oil and associated gas producing reservoir progresses, its pressure declines continuously until it is eventually necessary to supply energy to the system to maintain production. At the well level, this is done through so-called artificial systems, with gas lift being one of the most important. In general terms, gas lift consists of injecting gas into production string at a certain depth with the aim of reducing the back pressure at the bottom and increasing the flow rate of the reservoir fluids. Gas injection can be done continuously or intermittently.

There are various methods for designing gas lift systems, which in any case involve complex calculations that require the use of computer tools. In this context, the objective of this work is: "To develop a computer program that automates calculations relevant to the design of continuous and intermittent gas lift systems".

This paper presents relevant background and concepts on the operation of gas lift systems. The type and mechanics of injection valves are addressed. For continuous gas lift systems, the process of unloading a well by injected gas is explained, as well as the procedures to determine the depth of placement of the valves, size the operating valve and calculate its opening pressure. Regarding the design of intermittent gas lift systems, the stages of a characteristic operating cycle are described and two design methods used in the industry are presented. Subsequently, the computer program resulting from this work is described and it is indicated how the results were verified. Finally, a parametric study with selected variables of gas lift systems is presented.

# Prefacio

El bombeo neumático (BN) es uno de los sistemas artificiales de producción más importantes utilizados en los campos petroleros del país para prolongar la vida productiva de los pozos. En términos generales, consiste en la inyección de gas en la sarta de producción a cierta profundidad con la finalidad de reducir la carga hidrostática; de esta manera, la presión en la cara de la formación productora disminuye y el gasto de aceite que aporta el yacimiento se incrementa. Aunque existen diferentes configuraciones, el gas de BN se inyecta usualmente del espacio anular del pozo a la tubería de producción a través de válvulas subsuperficiales acondicionadas para tal efecto.

Debido a su principio de operación, este sistema artificial es flexible, permitiendo obtener gastos de petróleo en un rango amplio de acuerdo con las necesidades del operador y la disponibilidad del gas de inyección. Por otra parte, no tiene restricciones para utilizarse en pozos terrestres o costa-afuera, así como en pozos verticales o direccionales.

Existen dos tipos de bombeo neumático: el continuo (BNC) y el intermitente (BNI). La diferencia entre ambos es que en el segundo se utiliza un sistema de control subsuperficial, accionado desde la superficie, que permite abrir y cerrar el paso del gas hacia la tubería de producción en ciclos preestablecidos en función de la presurización del espacio anular.

El diseño general de los sistemas de BN involucra cálculos complejos de gradientes de presión en el pozo en condiciones de flujo multifásico gas-líquido, así como para determinar la profundidad de colocación de las válvulas subsuperficiales y dimensionar su respectivo puerto de inyección. Para tal efecto, existen diversos métodos de diseño que, en cualquier caso, demandan el uso de herramientas computacionales para realizar los cálculos correspondientes. Al respecto, puede mencionarse que existe

software comercial para diseñar los sistemas de BN; sin embargo, difícilmente está disponible para los estudiantes de la carrera de ingeniería petrolera.

En este contexto, además de presentar una visión general de aspectos relevantes de los sistemas de BN continuo e intermitente y documentar algunos métodos de diseño, el objetivo del presente trabajo es: *“Desarrollar un programa de cómputo que automatice cálculos relevantes para el diseño de sistemas de bombeo neumático continuo e intermitente”*.

El trabajo está organizado de la siguiente manera. En el primer capítulo, se presentan antecedentes relevantes sobre la productividad de los pozos petroleros. Se aborda la función de los sistemas artificiales de producción y se describen las características de los sistemas de bombeo neumático. Se discute el uso de curvas de gradiente de presión y de temperatura en el diseño de los pozos. Se explica el procedimiento para calcular la presión de fondo, la potencia de compresión y el gasto de gas a través del puerto de inyección. Finalmente, se mencionan algunas consideraciones comunes para el diseño de los sistemas de bombeo neumático.

Una clasificación general de válvulas de inyección se presenta en el capítulo 2, donde también se discute su mecánica de apertura y cierre a condiciones operativas y en banco de calibración, incluyendo algunos ejemplos de estas operaciones. El capítulo finaliza con una descripción de los tipos de mandriles más comunes utilizados en el diseño del sistema de inyección subsuperficial.

El capítulo 3 comienza con la descripción del proceso de descarga de un pozo mediante la inyección de gas de BN. Posteriormente, se explica cómo determinar la profundidad de colocación de las válvulas de descarga, así como los pasos para dimensionar la válvula operante y calcular la presión de apertura de las válvulas.

El diseño de los sistemas de BNI se aborda en el capítulo 4. Primeramente, se describen las etapas de un ciclo característico de operación. Después se presentan dos métodos para diseñar este tipo de sistema artificial de producción. Por otra parte, se explican las cámaras de bombeo y se menciona el uso de émbolos en los sistemas de inyección.

Posteriormente, en el capítulo 5 se describen las características, interfaz gráfica de usuario y funcionalidades del programa de cómputo desarrollado en el marco de este trabajo, y se explica cómo configurar los cálculos de diseño de los sistemas de BNC y BNI. El capítulo termina con una discusión concerniente a la verificación de los resultados de la herramienta.

En el capítulo 6, se estudian los efectos de variables selectas de un sistema de BNC sobre el perfil de la presión en el pozo, así como en el número y profundidad de colocación de las válvulas de BN. Adicionalmente, se presenta una discusión sobre la presión de inyección y los requerimientos de compresión en el diseño de los sistemas de BNC.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones de este trabajo.

# Contenido

<b>Dedicatoria</b> .....	<b>i</b>
<b>Agradecimientos</b> .....	<b>ii</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>iv</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>v</b>
<b>Prefacio</b> .....	<b>vi</b>
<b>Contenido</b> .....	<b>ix</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>xvii</b>
<b>Nomenclatura</b> .....	<b>xvii</b>
<b>Capítulo 1 Antecedentes</b> .....	<b>1</b>
1.1 Productividad de un pozo y sistemas artificiales de producción .....	1
1.2 Bombeo neumático .....	3
1.3 Conceptos preliminares en el diseño del BN: curvas de gradiente de presión y de temperatura .....	5
1.3.1 Curvas de gradiente de presión .....	5
1.3.2 Curvas de gradiente de temperatura .....	8
1.4 Comportamiento del gas de inyección .....	9
1.4.1 Presión de fondo del gas de inyección .....	9
1.4.2 Flujo de gas a través de válvulas de BN .....	10
1.4.3 Área equivalente del puerto de inyección .....	14

1.4.4 Índice de carga de los fuelles .....	15
1.5 Consideraciones de diseño .....	17
1.5.1 Tipos de instalaciones .....	18
1.5.2 Optimización del gasto de inyección .....	19
1.5.3 Requerimientos de compresión .....	20
1.5.4 Modelo integrado .....	22
<b>Capítulo 2 Válvulas subsuperficiales .....</b>	<b>26</b>
2.1 Válvulas de bombeo neumático .....	26
2.2 Mecánica de válvulas .....	28
2.2.1 Válvulas operadas por presión de inyección IPO .....	29
2.2.2 Válvulas operadas por presión de producción PPO .....	32
2.2.3 Válvulas piloto .....	35
2.3 Calibración de válvulas .....	36
2.4 Mandriles .....	42
2.3.1 Combinación de mandril y portaválvulas .....	44
<b>Capítulo 3 Diseño del bombeo neumático continuo .....</b>	<b>47</b>
3.1 Proceso de descarga de un pozo con BNC .....	47
3.2 Diseño del BNC con base en el método API .....	49
3.2.1 Determinación de la profundidad de las válvulas .....	49
3.2.2 Dimensionamiento de la válvula operante y cálculo de la presión de apertura de las válvulas de descarga .....	52

<b>Capítulo 4</b>	<b>Diseño del bombeo neumático intermitente .....</b>	<b>55</b>
4.1	Secuencia de operación del BNI .....	55
4.2	Métodos de diseño de instalaciones con BNI .....	58
4.2.1	Método por gradiente de retroceso .....	58
4.2.2	Método de porcentaje de carga .....	61
4.3	Cámaras de bombeo neumático .....	63
4.4	Uso de émbolos en el BNI .....	66
<b>Capítulo 5</b>	<b>Programa de cómputo para automatizar cálculos de diseño de sistemas de BN .....</b>	<b>68</b>
5.1	Descripción del programa .....	68
5.1.1	Configuración para el sistema de BNC .....	71
5.1.2	Configuración para el diseño de BNI .....	75
5.2	Verificación de los resultados del programa de cómputo .....	80
5.2.1	Bombeo neumático continuo .....	80
5.2.2	Bombeo neumático intermitente .....	84
<b>Capítulo 6</b>	<b>Estudios paramétricos .....</b>	<b>87</b>
6.1	Caso base .....	87
6.1	Efecto del corte de agua .....	88
6.2	Efecto de la presión en la cabeza del pozo .....	91
6.3	Efecto de la densidad relativa del gas de inyección .....	93
6.4	Efecto del diámetro de la TP .....	95

6.5 Presión de inyección y requerimientos de compresión .....	97
<b>Conclusiones y Recomendaciones .....</b>	<b>99</b>
Conclusiones .....	99
Recomendaciones .....	101
<b>Referencias .....</b>	<b>102</b>
<b>Apéndices .....</b>	<b>105</b>
Apéndice A Gradiente de presión estático de gas de inyección .....	105
Caso 1 Temperatura variable y factor de compresibilidad fijo .....	107
Caso 2 Temperatura y factor de compresibilidad variables .....	108
Caso 3 Método iterativo con valores promedio de T y P .....	111
Apéndice B Modelo matemático simplificado para el comportamiento de válvulas de BN .....	113
B.1 Cálculo del desplazamiento del vástago .....	114
B.2 Cálculo del área equivalente de puerto abierto al flujo .....	115
Apéndice C Válvulas operantes .....	119
Apéndice D Instalación del programa .....	122

## Lista de figuras

Figura 1.1 Caídas de presión en un sistema integral de producción. ....	2
Figura 1.2 Reducción de la densidad de la columna de fluidos en un pozo por: a) el gas liberado asociado al aceite en pozos fluyentes y b) el gas inyectado en pozos con BN. 4	4
Figura 1.3 Gradientes de presión arriba y abajo del punto de inyección. ....	5
Figura 1.4 Curvas de gradiente de presión (modificada de Winkler y Blann, 2007), con el ejemplo de trazos para calcular la presión de fondo fluyendo a partir de la presión en la cabeza y cierto valor de RGL. ....	7
Figura 1.5 Carta de Kirkpatrick de gradiente de temperatura. ....	8
Figura 1.6 Flujo de gas a través de una válvula con diferentes diámetros de puerto. ...	11
Figura 1.7 Efecto de la variación de presión de producción sobre el gasto de gas. ....	13
Figura 1.8 Configuraciones de puerto con asiento recto y biselado. ....	13
Figura 1.9 Área de flujo en una válvula parcialmente abierta. ....	14
Figura 1.10 Área equivalente de puerto vs. carrera de vástago (generada con base en datos de Winkler y Blann, 2007). ....	15
Figura 1.11 Dispositivo de pruebas de sonda para válvulas de BN. ....	16
Figura 1.12 Determinación del índice de carga de los fuelles y máximo desplazamiento del vástago (Modificada de Winkler y Blann, 2007). ....	16
Figura 1.13 Tipos de instalaciones de los sistemas de bombeo neumático. ....	18
Figura 1.14 Efecto del gas de inyección en la producción de aceite. ....	20
Figura 1.15 Procedimiento iterativo para calcular la potencia de compresión. ....	21
Figura 1.16 Esquema de un sistema integral de producción con BN. ....	23
Figura 2.1 Válvula de bombeo neumático. ....	27

Figura 2.2 Válvula operada por presión de inyección, IPO. ....	29
Figura 2.3 Válvula operada por presión de producción, PPO. ....	33
Figura 2.4 Válvula piloto. ....	36
Figura 2.5 Banco de calibración de válvulas de BN. ....	37
Figura 2.6 Presión de cierre en banco de calibración. ....	38
Figura 2.7 Elementos de un mandril de hueco lateral. ....	43
Figura 2.8 Tipos básicos de mandriles para BN. ....	44
Figura 2.9 Configuraciones de válvulas de bombeo neumático. ....	45
Figura 2.10 Combinaciones de válvulas y mandriles. ....	46
Figura 3.1 Medición de las presiones instantáneas en TP y TR durante la descarga de un pozo con BNC. ....	48
Figura 4.1 Ciclo de BNI con múltiples puntos de inyección de gas (Modificado de Takács, 2005). ....	56
Figura 4.2 Retroceso de líquido en una instalación con BNI (Modificada de Blann et al., 1994). ....	58
Figura 4.3 Factor de espaciamiento (Modificado de Blann et al., 1994). ....	59
Figura 4.4 Instalación con cámara inserta. ....	64
Figura 4.5 Instalación con cámara de doble empacador. ....	64
Figura 4.6 Instalación de BNI con émbolo. ....	67
Figura 5.1 Interfaz gráfica de usuario del programa de cómputo desarrollado para automatizar los cálculos del diseño de bombeo neumático. ....	69
Figura 5.2 Interfaz gráfica para ingresar los datos de entrada para los cálculos de diseño de un sistema de BNC. ....	71

Figura 5.3 Aviso al usuario sobre forma de ingreso de datos. ....	72
Figura 5.4 Ventana del explorador para búsqueda del archivo de datos de entrada. ....	72
Figura 5.5 Configuración de los datos de entrada para los cálculos de diseño del BNC.	73
Figura 5.6 Resultados gráficos para el diseño de BNC. ....	74
Figura 5.7 Tabla de resultados para el diseño de BNC. ....	74
Figura 5.8 Configuración de los datos de entrada para los cálculos de diseño del BNI.	75
Figura 5.9 Resultados gráficos para el diseño de BNI con el método de “ <i>Gradiente de retroceso</i> ”.....	77
Figura 5.10 Tabla de resultados para el diseño de BNI con el método de “ <i>Gradiente de retroceso</i> ”.....	77
Figura 5.11 Resultados gráficos para el diseño de BNI cn el método de “ <i>Porcentaje de carga</i> ” para una relación 60/60.....	78
Figura 5.12 Tabla de resultados para el diseño de BNI con el método de “ <i>Porcentaje de carga</i> ” para una relación 60/60.....	78
Figura 5.13 Resultados gráficos para el diseño de BNI con el método de “ <i>Porcentaje de carga</i> ” para una relación 40/60.....	79
Figura 5.14 Tabla de resultados para el diseño de BNI con el método de “ <i>Porcentaje de carga</i> ” para una relación 40/60.....	79
Figura 6.1 Efecto de corte de agua - 40%.....	89
Figura 6.2 Efecto de corte de agua - 50%.....	90
Figura 6.3 Efecto de corte de agua - 60%.....	90
Figura 6.4 Efecto de presión en la cabeza del pozo - 75 lb/pg <sup>2</sup> .....	91
Figura 6.5 Efecto de presión en la cabeza del pozo - 100 lb/pg <sup>2</sup> .....	92
Figura 6.6 Efecto de presión en la cabeza del pozo - 125 lb/pg <sup>2</sup> .....	92

Figura 6.7 Efecto de densidad relativa del gas de inyección - 0.65. ....	93
Figura 6.8 Efecto de densidad relativa del gas de inyección - 0.8. ....	94
Figura 6.9 Efecto de densidad relativa del gas de inyección - 0.9. ....	94
Figura 6.10 Efecto de diámetro de TP de 2.875 pg. ....	96
Figura 6.11 Efecto de diámetro de TP de 3.5 pg. ....	96
Figura A.1 Método iterativo para calcular la presión de fondo del gas de inyección. ...	112
Figura B.1 Válvula tipo IPO en posición cerrada. ....	114
Figura B.2 Válvula cerrada. ....	115
Figura B.3 Válvula parcialmente abierta. ....	116
Figura C.1 Válvulas operantes. ....	119
Figura C.2 Comportamiento dinámico de válvulas operantes tipo orificio y tipo venturi.	120
Figura D.1 Instalador del programa. ....	122
Figura D.2 Carpeta destino del programa y opción de acceso directo en escritorio. ...	123
Figura D.3 Elección de carpeta destino del Matlab Runtime. ....	123
Figura D.4 Verificación previa a la instalación del programa. ....	124
Figura D.5 Instalación exitosa. ....	124

## Lista de tablas

Tabla 1.1 Consideraciones de diseño (Modificada de Forero et al. 1993). .....	24
Tabla 1.2 Principales elementos en costos de inversión (Modificada de Forero et al. 1993). .....	24
Tabla 1.3 Principales consideraciones en costos operativos (Modificada de Forero et al. 1993). .....	25
Tabla 3.1 Especificaciones de válvulas con bola y asiento de canto afilado (Modificada de Winkler y Blann, 2007) .....	54
Tabla 5.1 Correlaciones PVT implementadas en el programa computacional. ....	70
Tabla 5.2 Métodos para calcular gradientes de presión y otros parámetros de diseño. 70	
Tabla 5.3 Datos de entrada para verificar los resultados del programa en el caso de un pozo con BNC (Modificado de Winkler y Blann, 2007). .....	80
Tabla 5.3 (Continuación) Datos de entrada para verificar los resultados del programa en el caso de un pozo con BNC (Modificado de Winkler y Blann, 2007). .....	81
Tabla 5.4 Resultados de Winkler y Blann (2007) para el caso analizado de diseño del BNC. ....	82
Tabla 5.5 Resultados obtenidos con el programa de cómputo desarrollado en este trabajo para el caso de diseño del BNC reportado por Winkler y Blann (2007). .....	82
Tabla 5.6 Errores relativos máximos correspondientes a los diversos parámetros del diseño de BNC con el programa de cómputo, para el caso reportado por Winkler y Blann (2007). .....	83
Tabla 5.7 Datos de entrada para verificar los resultados del programa en el caso de un pozo con BNI (Modificado de Winkler y Blann, 2007) .....	84
Tabla 5.8 Resultados de Winkler y Blann (2007) para el caso analizado de diseño del BNI con el método de gradiente de retroceso. ....	85

Tabla 5.9 Resultados obtenidos con el programa de cómputo desarrollado en este trabajo para el caso del diseño de BNI con el método de gradiente de retroceso, reportado por Winkler y Blann (2007). .....	85
Tabla 5.10 Errores relativos máximos correspondientes a los diversos parámetros del diseño de BNI calculados con el método de gradiente de retroceso en el programa de cómputo, para el caso reportado por Winkler y Blann (2007). .....	86
Tabla 6.1 Información adicional del pozo con BNC considerada en la definición del caso base para el estudio paramétrico. ....	88
Tabla 6.2 Requerimientos de compresión en función de la entrada de agua. ....	97
Tabla 6.3 Requerimientos de compresión en función de presión en la cabeza del pozo.	98
Tabla 6.4 Requerimientos de compresión en función de la densidad relativa del gas de inyección. ....	98
Tabla 6.5 Requerimientos de compresión en función del diámetro de la TP. ....	98

## Nomenclatura

<b>A</b>	Distancia de relajación, pie
<b>A<sub>b</sub></b>	Área de los fuelles de la válvula, pg <sup>2</sup>
<b>A<sub>p</sub></b>	Área del puerto de la válvula, pg <sup>2</sup>
<b>A<sub>pe</sub></b>	Área equivalente de puerto, pg <sup>2</sup>
<b>B<sub>lr</sub></b>	Índice de carga de los fuelles de la válvula, lb/pg <sup>2</sup> -pg
<b>C<sub>d</sub></b>	Coefficiente de descarga
<b>C<sub>L</sub></b>	Longitud de cámara de bombeo, pie
<b>C<sub>p</sub></b>	Calor específico a presión constante, Btu/lb-°F
<b>C<sub>T</sub></b>	Factor de corrección de presión de los fuelles de la válvula de inyección
<b>C<sub>v</sub></b>	Calor específico a volumen constante, Btu/lb-°F
<b>d</b>	Diámetro, pg
<b>d<sub>ce</sub></b>	Diámetro exterior de la TR, pg
<b>d<sub>ci</sub></b>	Diámetro interior de la TR, pg
<b>d<sub>ti</sub></b>	Diámetro interior de la TP, pg
<b>d<sub>pV</sub></b>	Diámetro del puerto de la válvula de inyección, 64 <sub>avos</sub> pg
<b>D</b>	Profundidad del pozo, pie
<b>D<sub>bv</sub></b>	Distancia entre válvulas, pie
<b>D<sub>bv min</sub></b>	Distancia mínima entre válvulas, pie
<b>D<sub>d</sub></b>	Profundidad del punto de inyección, pie
<b>D<sub>v</sub></b>	Profundidad de la válvula, pie
<b>E<sub>c</sub></b>	Eficiencia de compresión, fracción
<b>E<sub>pi</sub></b>	Efecto de presión-inyección, lb/pg <sup>2</sup>

<b>E<sub>pp</sub></b>	Efecto de presión-producción, lb/pg <sup>2</sup>
<b>F<sub>c</sub></b>	Fuerza de cierre en la válvula, lb <sub>f</sub>
<b>F<sub>o</sub></b>	Fuerza de apertura en la válvula, lb <sub>f</sub>
<b>F<sub>pi</sub></b>	Factor de presión-inyección
<b>F<sub>pp</sub></b>	Factor de presión-producción
<b>F<sub>s</sub></b>	Factor de seguridad = 1.1
<b>g</b>	Aceleración de la gravedad, 32.17 pie/s <sup>2</sup>
<b>g<sub>gio</sub></b>	Gradiente de presión del gas de inyección, lb/pg <sup>2</sup> -pie
<b>g<sub>ls</sub></b>	Gradiente del fluido de carga, lb/pg <sup>2</sup> -pie
<b>g<sub>o</sub></b>	Factor de conversión en la segunda ley de Newton, lb <sub>m</sub> -pie/lb <sub>f</sub> -s <sup>2</sup>
<b>g<sub>pfa</sub></b>	Gradiente de los fluidos de producción arriba del punto de inyección, lb/pg <sup>2</sup> -pie
<b>g<sub>PL</sub></b>	Gradiente de porcentaje de carga, lb/pg <sup>2</sup> -pie
<b>g<sub>Pvc</sub></b>	Gradiente de presión de cierre de las válvulas, lb/pg <sup>2</sup> -pie
<b>g<sub>Tv</sub></b>	Gradiente de temperatura, °F/pie
<b>H</b>	Altura de columna de líquido, pie
<b>H</b>	Relación de propiedades críticas en flujo isoentrópico estacionario.
<b>H<sub>hy</sub></b>	Carga hidrostática del líquido arriba de una cámara de bombeo, lb/pg <sup>2</sup>
<b>HP</b>	Potencia de compresión, hp
<b>k</b>	Relación de calores específicos, C <sub>p</sub> /C <sub>v</sub>
<b>m</b>	Masa del gas, lb
<b>M<sub>air</sub></b>	Masa del aire, 28.97 lb/lb-mol
<b>M<sub>ap</sub></b>	Peso molecular aparente del gas, lb
<b>M<sub>vs</sub></b>	Desplazamiento del vástago de la válvula, pg

<b>n</b>	Número de moles
<b>N<sub>c</sub></b>	Número de pasos de compresión
<b>P</b>	Presión, lb/pg <sup>2</sup>
<b>P<sub>bv</sub></b>	Presión de los fuelles a temperatura estándar, lb/pg <sup>2</sup>
<b>P<sub>bvD</sub></b>	Presión de los fuelles a la profundidad de la válvula, lb/pg <sup>2</sup>
<b>P<sub>c</sub></b>	Presión en el espacio anular a la profundidad de la válvula, lb/pg <sup>2</sup>
<b>P<sub>d</sub></b>	Presión corriente abajo, lb/pg <sup>2</sup>
<b>P<sub>d</sub></b>	Presión de descarga, lb/pg <sup>2</sup>
<b>P<sub>dc</sub></b>	Presión corriente abajo del estrangulador, lb/pg <sup>2</sup>
<b>P<sub>dr</sub></b>	Presión corriente debajo de la restricción, lb/pg <sup>2</sup>
<b>P<sub>ic</sub></b>	Presión del gas de inyección en la boca de la TR, lb/pg <sup>2</sup>
<b>P<sub>io</sub></b>	Presión superficial del gas de inyección, lb/pg <sup>2</sup>
<b>P<sub>ioD</sub></b>	Presión del gas de inyección a la profundidad de la válvula, lb/pg <sup>2</sup>
<b>P<sub>ko</sub></b>	Presión de arranque, lb/pg <sup>2</sup>
<b>P<sub>oD</sub></b>	Presión inicial de apertura a la profundidad de la válvula, lb/pg <sup>2</sup>
<b>P<sub>pfD</sub></b>	Presión de los fluidos de producción a la profundidad de la válvula, lb/pg <sup>2</sup>
<b>P<sub>pfD min</sub></b>	Presión mínima de los fluidos de producción a la profundidad de la válvula, lb/pg <sup>2</sup>
<b>P<sub>pfs</sub></b>	Presión de los fluidos de producción en superficie, lb/pg <sup>2</sup>
<b>P<sub>R</sub></b>	Presión del yacimiento, lb/pg <sup>2</sup>
<b>P<sub>s</sub></b>	Presión de succión, lb/pg <sup>2</sup>
<b>P<sub>t</sub></b>	Presión de los fluidos de producción a la profundidad de válvula, lb/pg <sup>2</sup>
<b>P<sub>trc</sub></b>	Presión de cierre en banco de calibración, lb/pg <sup>2</sup>
<b>P<sub>tro</sub></b>	Presión de apertura en banco de calibración, lb/pg <sup>2</sup>

<b><math>P_u</math></b>	Presión corriente arriba, lb/pg <sup>2</sup>
<b><math>P_{ur}</math></b>	Presión corriente arriba de la restricción, lb/pg <sup>2</sup>
<b><math>P_{vcD}</math></b>	Presión de cierre a la profundidad de la válvula, lb/pg <sup>2</sup>
<b><math>P_{voD}</math></b>	Presión de apertura a la profundidad de la válvula, lb/pg <sup>2</sup>
<b><math>P_{wf}</math></b>	Presión de fondo fluyendo, lb/pg <sup>2</sup>
<b><math>P_{wh}</math></b>	Presión en la cabeza del pozo, lb/pg <sup>2</sup>
<b><math>P_{ws}</math></b>	Presión de fondo estática, lb/pg <sup>2</sup>
<b><math>q_g</math></b>	Gasto de gas, Mpie <sup>3</sup> /d
<b><math>q_{gi}</math></b>	Gasto de gas de inyección, Mpie <sup>3</sup> /d
<b><math>q_{giu}</math></b>	Gasto máximo del gas de inyección, Mpie <sup>3</sup> /d
<b><math>q_{lt}</math></b>	Gasto máximo de fluidos totales
<b><math>R_{ct}</math></b>	Relación del volumen anular de la cámara al volumen de la TP
<b><math>RCT</math></b>	Relación de compresión
<b><math>R_g</math></b>	Constante del gas, $R_u/M_a$
<b><math>RG_iL</math></b>	Relación gas de inyección-líquido, pie <sup>3</sup> /bl
<b><math>r_b</math></b>	Radio de la bola de la válvula, pg
<b><math>r_p</math></b>	Radio de puerto de la válvula, pg
<b><math>r_t</math></b>	Radio de la base menor de un cono truncado, pg
<b><math>R_u</math></b>	Constante universal del gas, 1545.4 lb <sub>f</sub> -pie/(lb-mol °R)
<b><math>S</math></b>	Efecto del resorte en la válvula, lb/pg <sup>2</sup>
<b><math>s</math></b>	Altura inclinada del cono truncado, pg
<b><math>S_f</math></b>	Factor de espaciado, lb/pg <sup>2</sup> -pie
<b><math>T_{bvD}</math></b>	Temperatura de los fuelles a la profundidad de la válvula, °F

<b>T<sub>gD</sub></b>	Temperatura del gas a la profundidad de la válvula, °F
<b>T<sub>vuD</sub></b>	Temperatura de descarga a la profundidad de la válvula, °F
<b>T<sub>wh</sub></b>	Temperatura en la cabeza del pozo, °F
<b>T<sub>ws</sub></b>	Temperatura en el fondo del pozo, °F
<b>V</b>	Volumen, pie <sup>3</sup>
<b>V<sub>ca</sub></b>	Capacidad del espacio anular de cámara de bombeo, pie <sup>3</sup> /pie
<b>V<sub>t</sub></b>	Capacidad por pie de la TP arriba de la cámara, pie <sup>3</sup> /pie
<b>W<sub>T</sub></b>	Gasto másico de la mezcla, lb <sub>m</sub> /s
<b>Z</b>	Factor de compresibilidad del gas
<b>γ<sub>g</sub></b>	Densidad específica del gas
<b>γ<sub>o</sub></b>	Densidad específica del aceite
<b>ΔP<sub>io</sub></b>	Decremento mínimo de presión de gas de inyección entre válvulas, lb/pg <sup>2</sup>
<b>ΔP<sub>pe</sub></b>	Efecto de presión-producción adicional, lb/pg <sup>2</sup>
<b>ΔP<sub>sD</sub></b>	Diferencial de presión asignada al espaciamiento de válvulas, lb/pg <sup>2</sup>
<b>ρ<sub>g</sub></b>	Densidad del gas, lb/pie <sup>3</sup>
<b>ρ<sub>L</sub></b>	Densidad de la fase líquida, lb <sub>m</sub> /pie <sup>3</sup>
<b>θ</b>	Ángulo de inclinación del pozo respecto a la vertical, grados

# Capítulo 1

## Antecedentes

En este capítulo, se abordan antecedentes sobre la productividad de los pozos petroleros y la función de los sistemas artificiales de producción. En particular, se describen las características de los sistemas de bombeo neumático. Se discute el uso de curvas de gradiente de presión y de temperatura en el diseño de los pozos. Por otra parte, se describe cómo calcular la presión de fondo, la potencia de compresión y el gasto de gas a través del puerto de inyección. Finalmente, se mencionan algunas consideraciones comunes para el diseño de los sistemas de bombeo neumático.

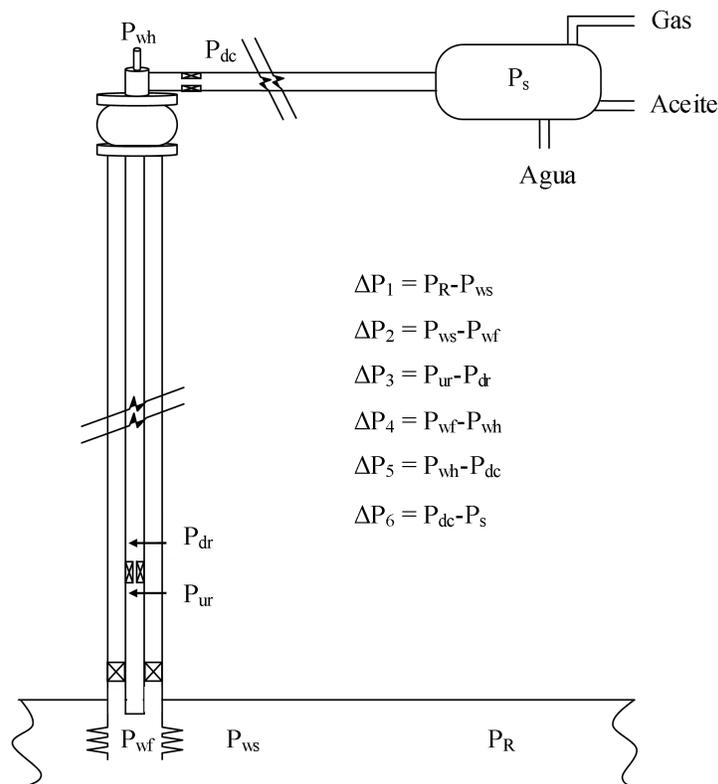
### 1.1 Productividad de un pozo y sistemas artificiales de producción

Un pozo es el conducto que comunica un yacimiento con las instalaciones superficiales, permitiendo transportar el aceite, gas y/o agua desde el medio poroso hasta el árbol de válvulas; cabe destacar que también puede ser acondicionado para inyectar fluidos al yacimiento en procesos de recuperación secundaria. Ahora bien, una vez concluida la terminación del pozo, para iniciar la producción se requiere una caída de presión favorable en el sistema integral de producción. Al respecto, las caídas de presión más relevantes se indican en la **Figura 1.1** (nomenclatura al principio).

El transporte de los fluidos desde el yacimiento hasta la superficie depende de la energía contenida en el mismo. Cuando ésta es suficiente para contrarrestar las caídas de presión a lo largo del sistema, se dice que el pozo es fluyente. En caso contrario,

sea por la baja presión del yacimiento o por las propias caídas de presión en el pozo o las instalaciones superficiales, será necesario aportar energía al sistema. Este aporte adicional de energía puede ser a nivel de yacimiento o a nivel de pozo.

En el primer caso, se trata de procesos de recuperación secundaria, cuyo objetivo es mantener la presión del yacimiento mediante la inyección de agua o gas inmisible. Por otra parte, cuando la energía se suministra a nivel de pozo, el objetivo principal es reducir la carga hidrostática en la sarta de producción; este proceso se lleva a cabo en sistemas productores de petróleo y gas asociado mediante los llamados sistemas artificiales de producción (SAP), tales como el bombeo neumático, el bombeo mecánico y el bombeo electrocentrífugo sumergible, por mencionar los más comunes. Para una revisión más detallada de estos y otros sistemas artificiales se puede consultar el trabajo de Lea (2007).



**Figura 1.1** Caídas de presión en un sistema integral de producción.

Ahora bien, la productividad del sistema integral de producción depende de múltiples factores: propiedades de los fluidos; propiedades petrofísicas, daño y mecanismos de empuje del yacimiento; diseño de la sarta de producción; sistema artificial implementado; diámetro del estrangulador, diámetro y longitud de la línea de descarga y ductos; así como las características de diseño y operación de separadores, equipos de bombeo y compresión, por mencionar algunos. Todos estos factores juegan un papel importante en el comportamiento del pozo y deben ser considerados en el diseño, operación y análisis integral del sistema. En cualquier caso, el objetivo es maximizar el aprovechamiento de la energía natural del yacimiento.

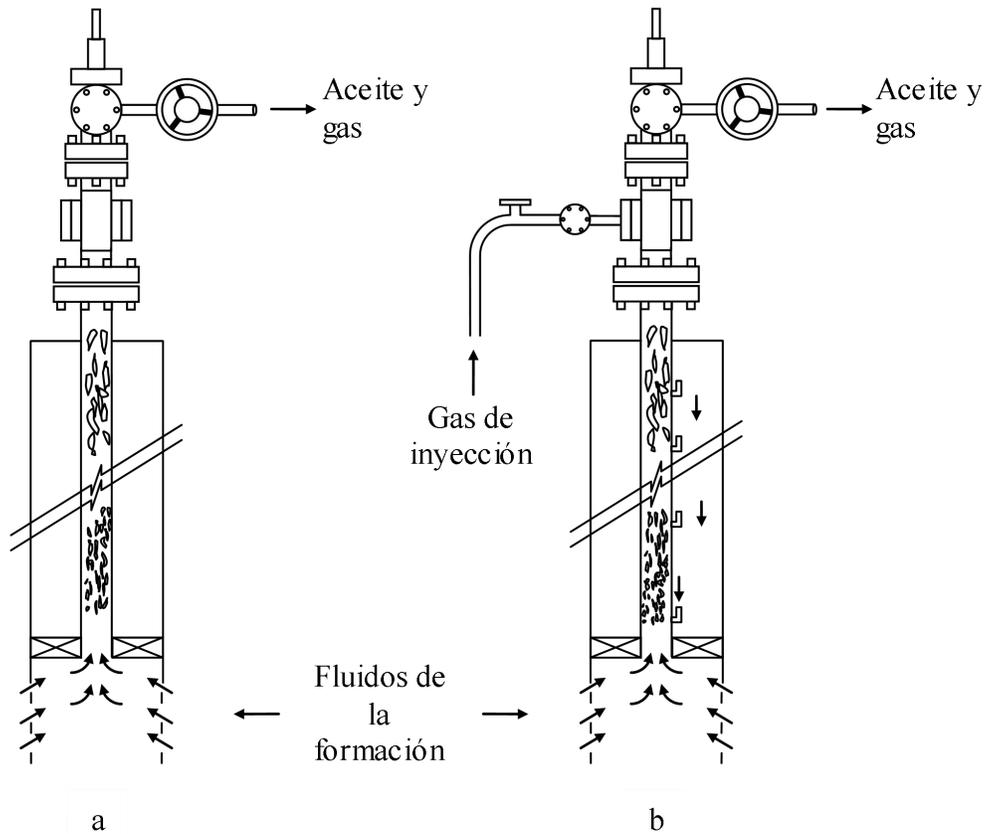
## 1.2 Bombeo neumático

En términos generales, el bombeo neumático (BN) consiste en inyectar gas en el pozo a cierta profundidad con el objetivo de aligerar la columna hidrostática y favorecer la entrada de fluidos del yacimiento. Para explicar su principio de operación, considerar la **Figura 1.2**. Primeramente, en un pozo fluyente (**Figura 1.2a**), el gas disuelto en el aceite se libera y expande conforme el fluido asciende a la superficie. El gas libre, siendo más ligero que el aceite, reduce la densidad de la mezcla y, por lo tanto, el peso de la columna; como resultado, la contrapresión en el fondo se reduce y el gasto de los fluidos aportados por el yacimiento se incrementa.

Por otra parte, en los pozos con BN (**Figura 1.2b**), el gas de inyección tiene el mismo efecto que el gas asociado liberado, con la ventaja de poder controlar el ritmo de inyección para alcanzar la meta de producción de aceite. De esta manera, el BN es el sistema artificial de producción que más se acerca al proceso de flujo natural, por lo que puede considerarse como una extensión de éste.

En comparación con otros sistemas artificiales, el BN es el único que no utiliza un sistema mecánico para forzar físicamente al fluido del fondo a la superficie, como es el caso del bombeo mecánico y el bombeo electrocentrífugo. Por lo tanto, su implementación resulta particularmente adecuada en instalaciones marinas, donde se

tienen limitaciones de espacio; asimismo, en pozos desviados, en los cuales hay restricciones relacionadas a su geometría y trayectoria.



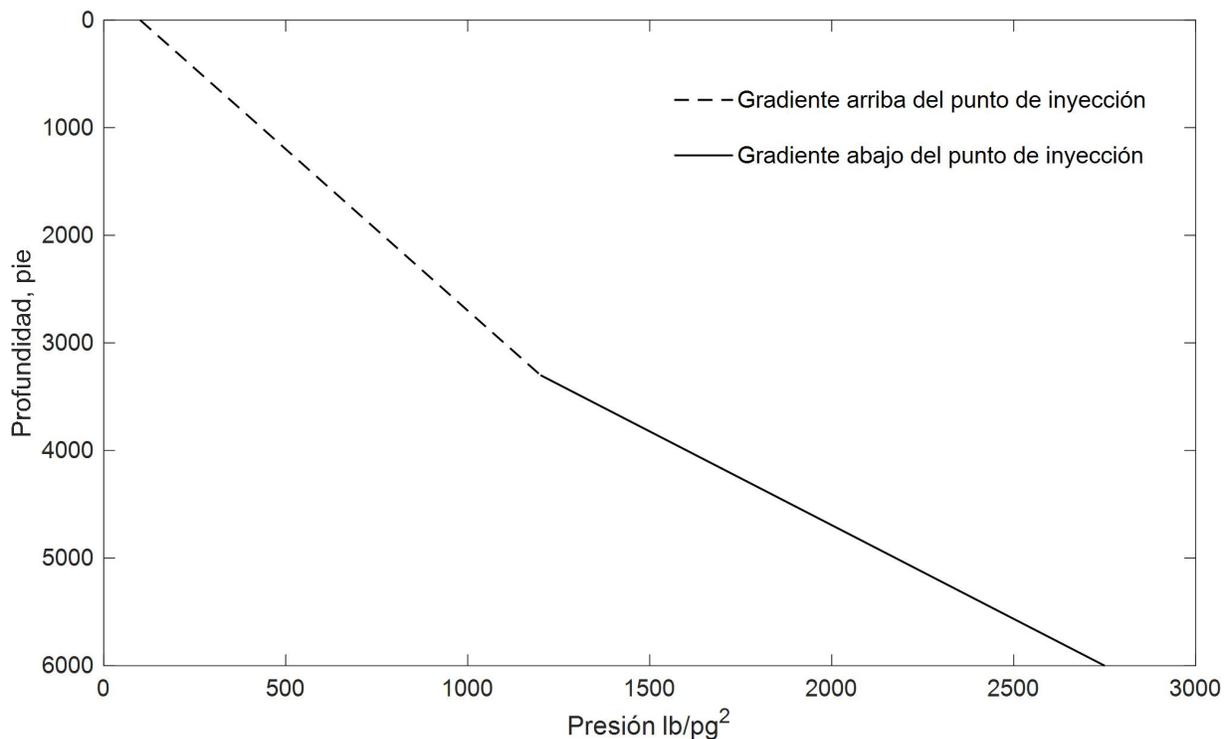
**Figura 1.2** Reducción de la densidad de la columna de fluidos en un pozo por: a) el gas liberado asociado al aceite en pozos fluyentes y b) el gas inyectado en pozos con BN

Para finalizar esta sección, cabe mencionar que los sistemas de bombeo neumático se diferencian en dos tipos dependiendo de si el gas se inyecta de manera continua o de forma intermitente en ciclos preestablecidos. Mas adelante, se describen las características y principios de operación y diseño de cada uno de ellos.

## 1.3 Conceptos preliminares en el diseño del BN: curvas de gradiente de presión y de temperatura

### 1.3.1 Curvas de gradiente de presión

En el diseño de los pozos, es importante conocer como varía la presión en condiciones de flujo a diferentes profundidades. A una gráfica de estas variables se le conoce en la práctica ingenieril como curva de gradiente de presión. Ahora bien, como se mencionó en secciones previas, existe una analogía entre el bombeo neumático continuo (BNC) y el flujo natural; sin embargo, en aquél se diferencian dos gradientes de presión (**Figura 1.3**): uno por debajo del punto de inyección, donde se tiene el flujo de los fluidos producidos por el yacimiento (gas de formación, aceite y agua); y otro por encima de punto de inyección, donde además se tiene la presencia del gas de inyección.



**Figura 1.3** Gradientes de presión arriba y abajo del punto de inyección.

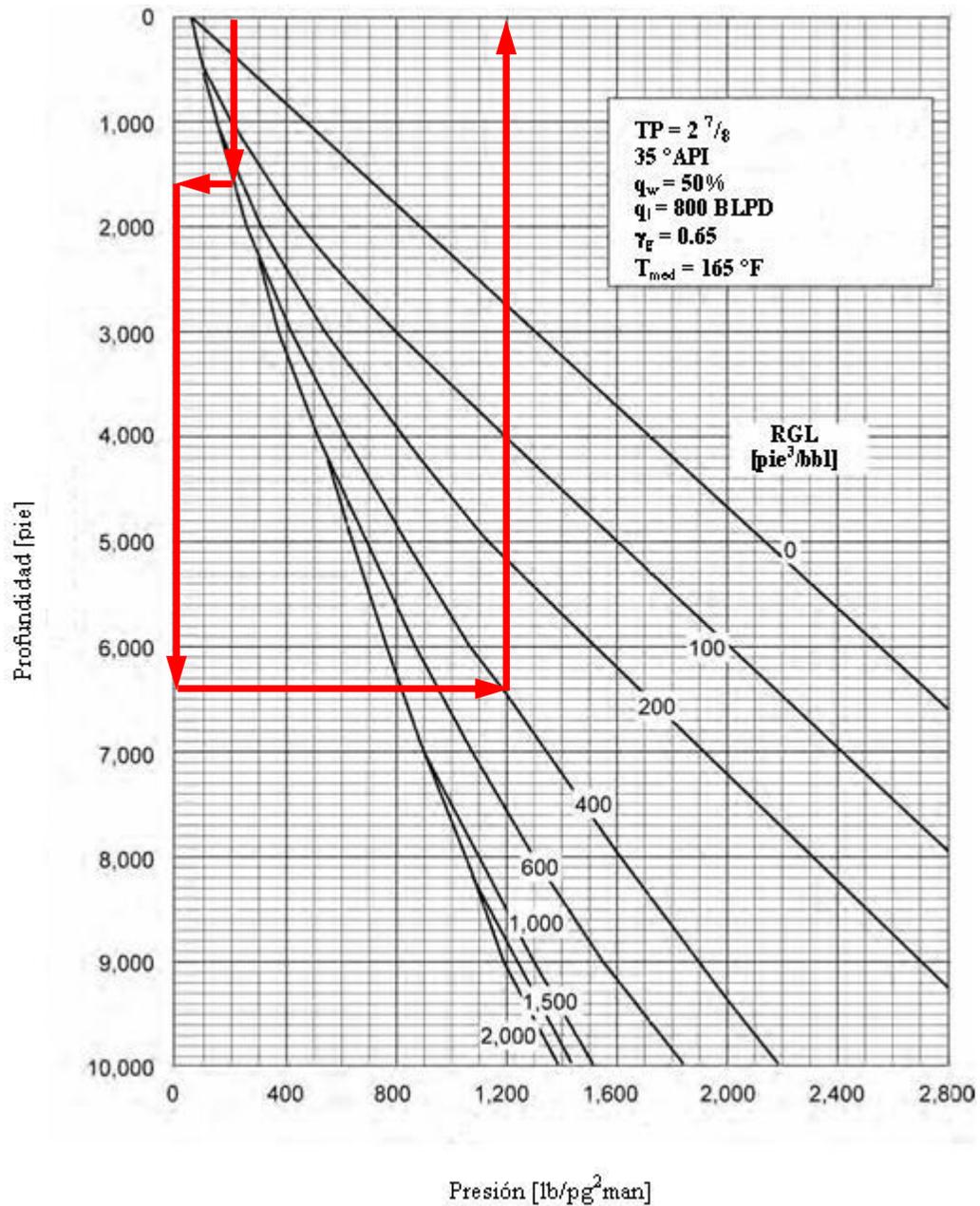
Antes de la masificación de las computadoras personales, para diseñar los pozos era común utilizar curvas de gradiente publicadas en la literatura especializada. Éstas se calculaban para diferentes condiciones de operación, diámetros de tubería y propiedades de los fluidos mediante correlaciones de flujo multifásico, como las de Orkiszewski (1967) y Beggs y Brill (1973), entre otras. Como ejemplo, en la Figura 1.4 se muestran curvas de gradiente de presión para diferentes relaciones gas-líquido (RGL), considerando el flujo de aceite, gas y agua en una tubería vertical de 2 7/8", con una producción de 800 bpd de líquido y corte de agua de 50%, aceite de 35 °API y gas asociado de 0.65 de densidad relativa, y a una temperatura promedio de 165 °F (Winkler y Blann, 2007).

Los pasos para calcular la presión de fondo de flujo mediante curvas de gradiente para cierto valor de presión en la cabeza y RGL son los siguientes son:

- 1) Partiendo del valor de la presión en la cabeza del pozo, trazar una línea vertical descendente hasta cortar la curva correspondiente a la RGL del problema.
- 2) A partir del punto de intersección identificado en el paso 1, se traza una línea horizontal hasta cortar el eje de profundidad.
- 3) En el eje de profundidad, contabilizar hacia abajo la longitud correspondiente a la sarta de producción a partir del punto de intersección del punto 2. El punto final corresponderá al fondo del pozo.
- 4) A partir de punto correspondiente al fondo del pozo, se traza una línea horizontal hasta cortar nuevamente la curva correspondiente a la RGL del problema.
- 5) A partir del punto de intersección del punto 4, trazar una línea vertical ascendente hasta cortar el eje de la presión. El punto de corte corresponderá a la presión de fondo de flujo.

Para ilustrar el procedimiento anterior, considerar un pozo vertical de 4800 pies de profundidad y una RGL de 400 pie<sup>3</sup>/bl, y con las características indicadas en la **Figura 1.4**. Si la presión en la cabeza del pozo es de 200 lb/pg<sup>2</sup>, los trazos mostrados indican que la presión de fondo de flujo es de 1200 lb/pg<sup>2</sup>.

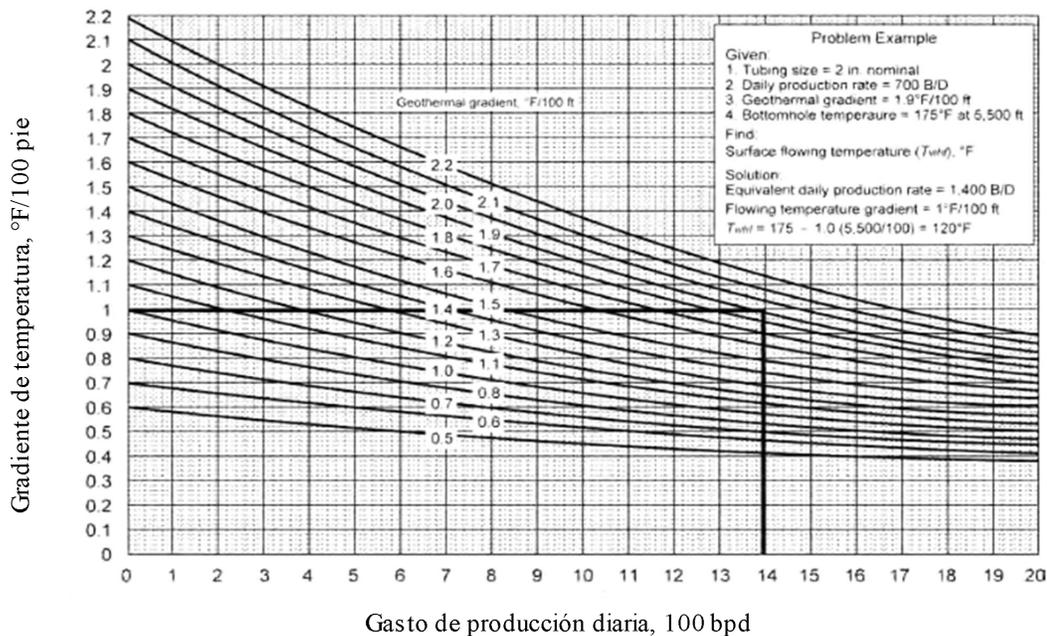
Para finalizar, cabe señalar que puede implementarse un procedimiento similar para calcular la presión en la cabeza a partir de la presión de fondo fluendo, pero realizando los pasos en sentido inverso



**Figura 1.4** Curvas de gradiente de presión (modificada de Winkler y Blann, 2007), con el ejemplo de trazos para calcular la presión de fondo fluendo a partir de la presión en la cabeza y cierto valor de RGL.

### 1.3.2 Curvas de gradiente de temperatura

Como en el caso de las curvas de gradiente de presión, en la literatura también se tiene disponibles gráficas que permiten estimar los gradientes de temperatura del fluido transportado a través de tuberías en el subsuelo. Como ejemplo, puede mencionarse la carta de Kirkpatrick (1959), mostrada en la **Figura 1.5**; en este caso, el gradiente de temperatura se determina a partir de la producción diaria y el gradiente geotérmico del sitio.



**Figura 1.5** Carta de Kirkpatrick de gradiente de temperatura.

Ahora bien, también existen modelos analíticos que puede utilizarse para estimar la temperatura en pozos bajo condiciones fluyentes. Como ejemplo de uno de ellos, se tiene la ecuación de Shiu y Beggs (1980), la cual depende de la longitud de la tubería, el gradiente geotérmico, una temperatura conocida (sea a la entrada o a la salida) y un parámetro conocido como distancia de relajación; el modelo permite calcular la temperatura en la cabeza del pozo a partir de la temperatura de fondo fluyendo, o viceversa. La ecuación de estos autores es la siguiente:

$$T_{wh} = T_{ws} - g_T h \sin \theta + g_T A \left(1 - e^{-h/A}\right), \quad (1.1)$$

donde la distancia de relajación, A, está dada por:

$$A = e^{-5.065} W_T^{0.4882} d^{-0.3476} \gamma_o^{0.2519} \gamma_g^{4.724} \rho_L^{2.915} \rho_{whf}^{0.2219}. \quad (1.2)$$

## 1.4 Comportamiento del gas de inyección

Toda vez que el gas es el fluido de trabajo en una instalación de BN, resulta imprescindible conocer su comportamiento a fin de determinar la presión necesaria del gas de inyección para iniciar la descarga del pozo, así como el gasto de gas a través de las válvulas de inyección para el buen funcionamiento de éstas. A continuación, se abordan estos y otros aspectos relevantes al respecto.

### 1.4.1 Presión de fondo del gas de inyección

Para determinar la presión de fondo del gas de inyección a una profundidad dada,  $P_{ioD}$ , se deben considerar los siguientes casos:

a) Temperatura variable y factor de compresibilidad constante

$$P_{ioD} = P_{io} \left(1 + \frac{bh}{a}\right)^{\frac{1}{R'Zb}}. \quad (1.3)$$

b) Temperatura y factor de compresibilidad variables

$$P_{ioD} = P_{io} \left(\frac{K_1 h + K_3}{K_2 h + K_3}\right)^{m_g}. \quad (1.4)$$

c) Método iterativo con promedio de  $T$  y  $P$

En este caso se calcula una temperatura media entre la  $T_{wh}$  y la  $T_{ws}$  asumiendo una  $P_{med}$ . Luego, con  $Z = Z(T_{med}, P_{med})$  se itera sobre el siguiente modelo:

$$P_{ioD} = P_{io} e^{\frac{\gamma_g h}{53.34(T_{med}+460) Z_{med}}}. \quad (1.5)$$

El desarrollo para la obtención de las **ecuaciones 1.3, 1.4 y 1.5** se muestra en el apéndice A.

### 1.4.2 Flujo de gas a través de válvulas de BN

Una de las tareas más importantes en el diseño de un sistema de BN es encontrar el diámetro del puerto de la válvula,  $d_{pv}$ , para lo cual puede utilizarse la **ecuación 1.6** (Beggs, 1984) la cual es aplicable tanto a flujo crítico como subcrítico, en válvulas de orificio o, en válvulas calibradas completamente abiertas luego de realizar algunas correcciones a la ecuación.

$$q_g = C_n P_u d_{pv}^2 \sqrt{\frac{k H}{\gamma_g (T+460) Z (k-1)}}, \quad (1.6)$$

donde:

$$H = \left(\frac{P_d}{P_u}\right)^{2/k} - \left(\frac{P_d}{P_u}\right)^{(k+1)/k}, \quad (1.7)$$

y

$$C_n = \frac{C_s C_d T_{sc}}{P_{sc}}. \quad (1.8)$$

Las constantes en la **ecuación 1.8** son la siguientes:  $P_{sc} = 14.696 \text{ lb/pg}^2$ ,  $T_{sc} = 519.68 \text{ }^\circ\text{R}$ ,  $C_s = 27.611$ . Por otra parte, el coeficiente de descarga,  $C_d$ , depende del diámetro del puerto de la válvula,  $d_{pv}$ , y se determina con la **ecuación 1.9** de la siguiente forma:

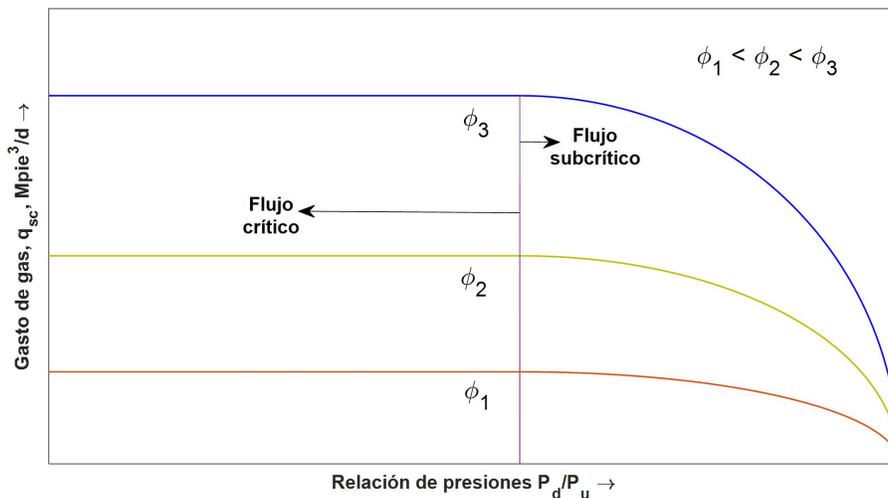
Si  $2/64 \text{ pg} < d_{pv} < 32/64 \text{ pg}$ :

$$C_d = 0.548924 + 3.720401 \times 10^{-2} d_{pv} - 1.603191 \times 10^{-3} d_{pv}^2 + 2.387117 \times 10^{-5} d_{pv}^3 - 4.9942371 \times 10^{-8} d_{pv}^4. \quad (1.9)$$

Cuando el diámetro de puerto es mayor de  $32/64 \text{ pg}$ ,  $C_d = 0.828$ .

Para calcular el coeficiente de descarga, se debe resolver la **ecuación 1.6** para  $d_{pv}$  y luego la **ecuación 1.9**; luego, el coeficiente de descarga y el diámetro de puerto ya calculados, se sustituyen de nuevo en la **ecuación 1.6** para determinar el gasto de gas.

Con respecto a los regímenes de flujo a través de orificios, en la **Figura 1.6** se muestra el comportamiento típico del gasto de gas con respecto a la relación de las presiones corriente abajo y corriente arriba, para diferentes diámetros de puerto.



**Figura 1.6** Flujo de gas a través de una válvula con diferentes diámetros de puerto.

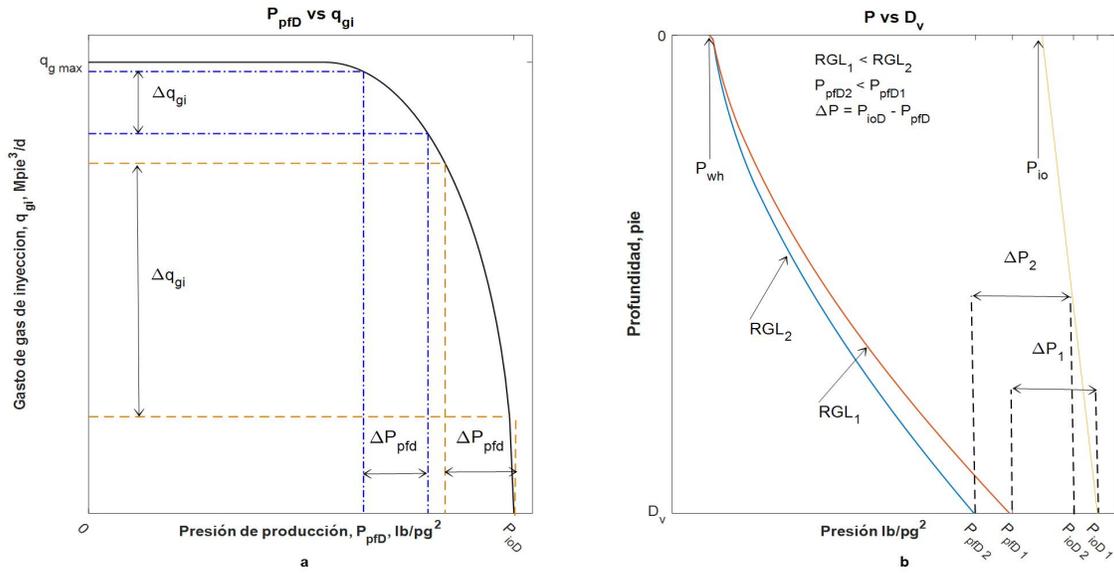
Como puede verse en la **Figura 1.6**, cuando la presión corriente arriba del puerto de la válvula,  $P_u$ , permanece constante hay un solo gasto para cada valor de presión corriente abajo,  $P_d$ ; conforme ésta disminuye, el gasto de gas,  $q_g$ , se incrementa hasta alcanzar un valor máximo llamado flujo crítico. En condiciones de flujo crítico, cualquier disturbio de presión corriente abajo de la válvula no se propagará corriente arriba.

La **Figura 1.7** muestra el efecto de las fluctuaciones de la presión de producción,  $P_{pD}$ , sobre el gasto de gas a través de una válvula de orificio. Como puede verse en la **Figura 1.7a**, un abatimiento en la presión de producción en la región de flujo subcrítico da como resultado un incremento del gas de inyección, mayor que aquél en la vecindad del flujo crítico para el mismo abatimiento de presión.

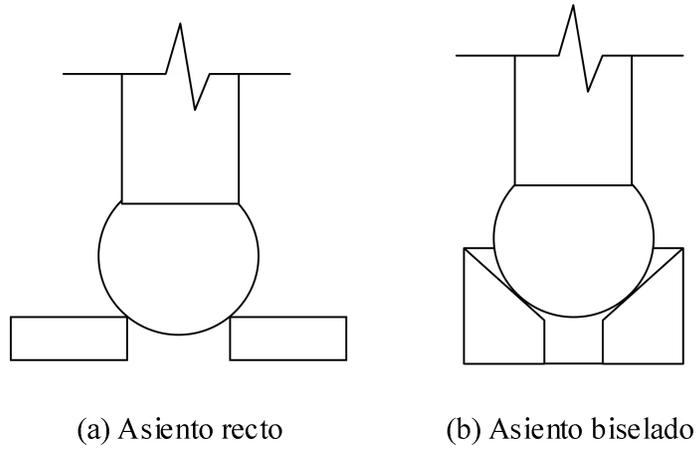
Por otra parte, como se muestra en el gráfico de P vs D en la **Figura 1.7b**, un incremento en el gasto de gas de inyección a través de la válvula aumenta la RGL en la TP; esto reduce aún más la presión de producción con un incremento adicional en el gasto de gas inyección, lo que reduce la presión de inyección en la TR. Como resultado final, aumenta el gasto de producción; con ello, la presión en la TP crecerá de nuevo reduciendo la RGL hasta que la presión del gas de inyección se estabiliza nuevamente.

Todos los efectos antes mencionados pueden presentarse como un ligero cabeceo en el pozo; en caso severos, se manifiestan como amplias variaciones en el gasto de producción, afectando de manera importante la operación de las instalaciones superficiales (separadores, compresores, bombas) e incluso pueden causar daño a la formación.

El gasto de gas a través de la válvula también es afectado por la geometría del puerto de inyección ya que el asiento de la válvula puede ser recto o biselado, como se muestra en la **Figura 1.8**. Como puede observarse, en la **Figura 1.8a** el área de puerto  $A_p$  es igual al área de la perforación a través del asiento, mientras que en **1.8b** el área está definida por el contacto con el bisel.



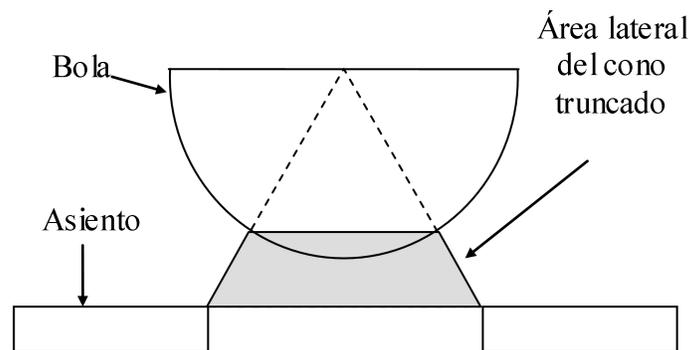
**Figura 1.7** Efecto de la variación de presión de producción sobre el gasto de gas.



**Figura 1.8** Configuraciones de puerto con asiento recto y biselado.

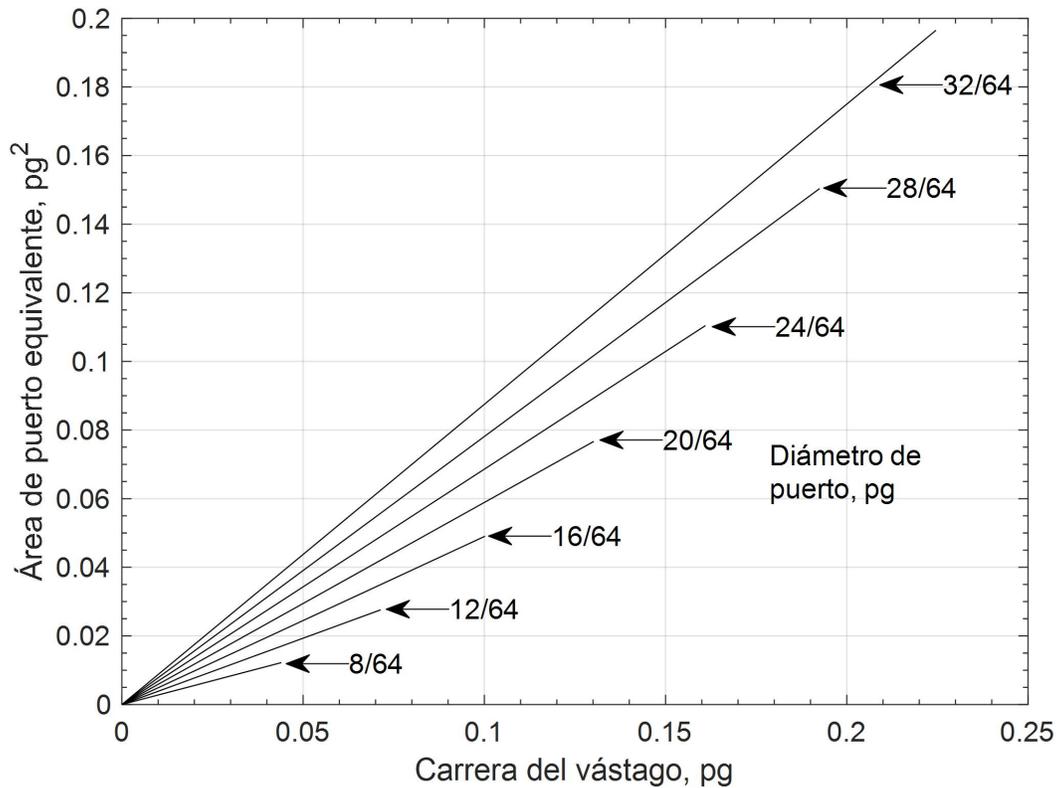
### 1.4.3 Área equivalente del puerto de inyección

El área equivalente del puerto, previo a que la válvula abra completamente, se determina a partir de la altura inclinada de un cono truncado recto,  $s$ , generado entre la superficie de la bola y la línea del asiento de la válvula (**Figura 1.9**). El radio de la base mayor del cono truncado es igual al radio del puerto de la válvula,  $r_p$ , el cual permanece constante; por otra parte, el radio de la base menor,  $r_t$ , disminuye conforme el vástago se desplaza y la bola se aleja del asiento.



**Figura 1.9** Área de flujo en una válvula parcialmente abierta.

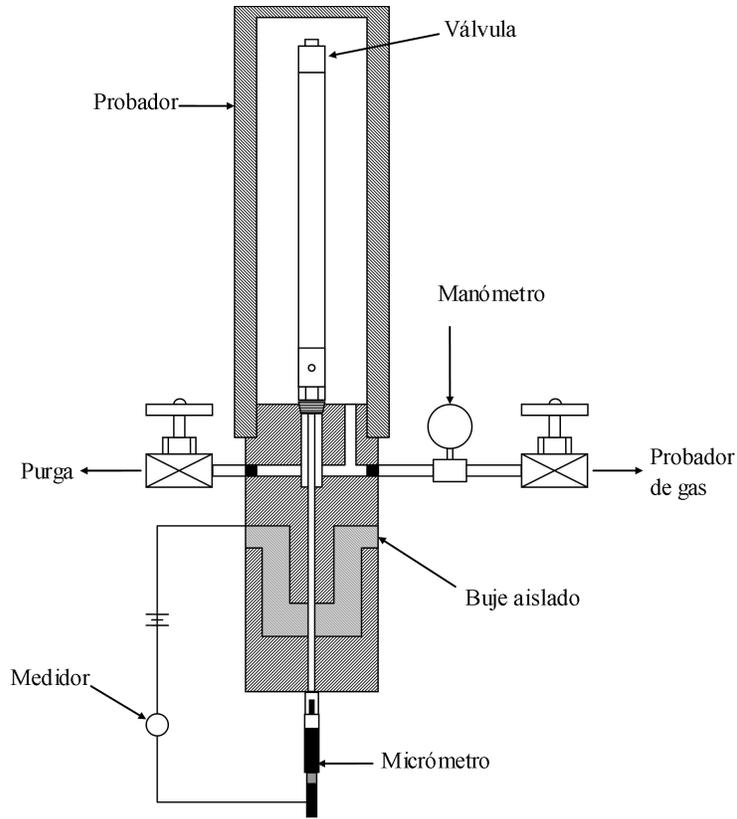
Cabe mencionar que el desplazamiento del vástago para abrir completamente una válvula aumenta con el tamaño del puerto de inyección. En la **Figura 1.10**, se muestran un gráfico construido en este trabajo a partir de datos publicados en la literatura (Winkler y Blann, 2007), que permite determinar el área equivalente de puerto en función de la carrera del vástago, para diferentes diámetros de puerto.



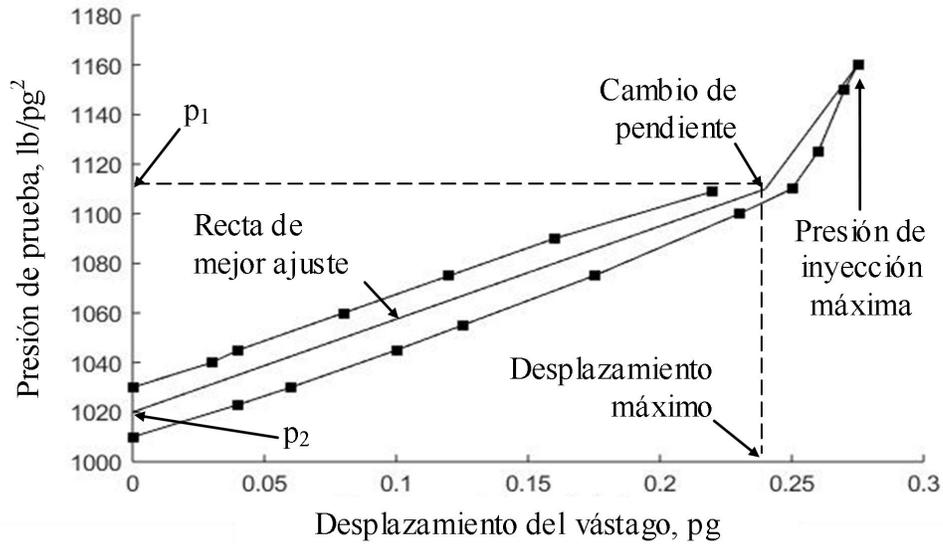
**Figura 1.10** Área equivalente de puerto vs. carrera de vástago (generada con base en datos de Winkler y Blann, 2007)

#### 1.4.4 Índice de carga de los fuelles

El desplazamiento del vástago,  $M_{vs}$ , es función del índice de carga de los fuelles,  $B_{lr}$ , el cual se define como el incremento de presión ejercida sobre el área total de los fuelles por unidad de desplazamiento del vástago (Decker, 1986). Para calcular  $B_{lr}$ , se emplea el dispositivo mostrado en la **Figura 1.11**; el procedimiento consiste en llevar a cabo incrementos de presión y registrar el desplazamiento del vástago; después se realiza el proceso inverso con decrementos de presión. Las curvas obtenidas serán diferentes debido a la histéresis de los fuelles. Por lo tanto, deberá ajustarse una línea recta que corresponda al promedio de ambas curvas, como se muestra en la **Figura 1.12**, donde la curva superior corresponde a los incrementos de presión, y la curva inferior a los decrementos de presión. El índice de carga de los fuelles es la pendiente de la recta de mejor ajuste.



**Figura 1.11** Dispositivo de pruebas de sonda para válvulas de BN.



**Figura 1.12** Determinación del índice de carga de los fuelles y máximo desplazamiento del vástago (Modificada de Winkler y Blann, 2007).

El desplazamiento máximo del vástago se encuentra en el punto donde cambia la pendiente. Luego entonces, el índice de carga de los fuelles está dado por

$$B_{lr} = \frac{P_1 - P_2}{dx}. \quad (1.10)$$

Dado que, el radio de la base menor,  $r_t$ , y la altura inclinada del cono truncado,  $s$ , son función del desplazamiento del vástago,  $M_{vs}$ , el área equivalente de puerto está dada por:

$$A_{pe} = \pi (r_t + r_p) s. \quad (1.11)$$

Sustituyendo la **ecuación 1.11** en la **ecuación 1.6** queda de la siguiente forma:

$$q_g = 4 C_n P_u (r_t + r_p) s \sqrt{\frac{k H}{\gamma_g (T+460) Z (k-1)}}. \quad (1.12)$$

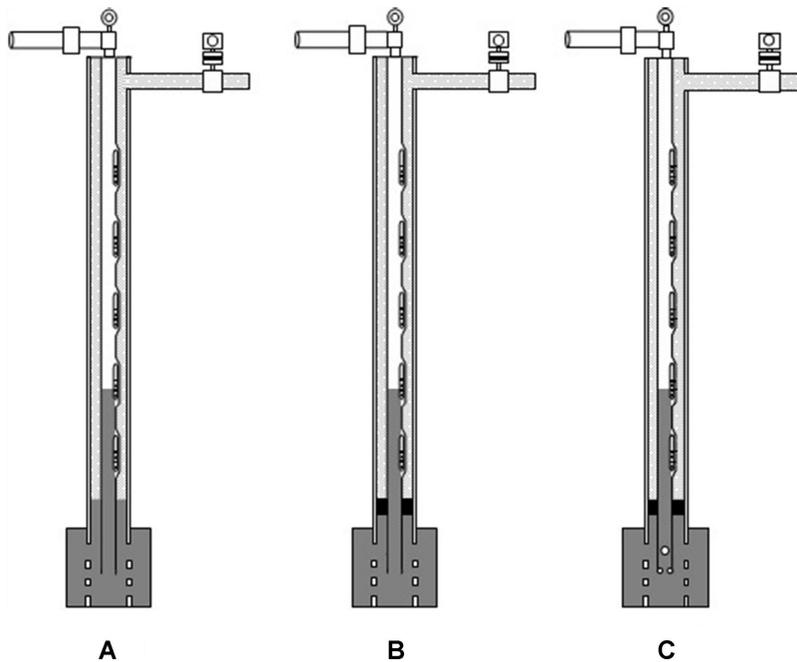
En el apéndice B se muestra el modelo simplificado para determinar el desplazamiento del vástago (Decker, 1986) y el área equivalente de puerto.

## 1.5 Consideraciones de diseño

En la etapa de diseño de la terminación de un pozo, es importante considerar el sistema artificial de levantamiento que será utilizado eventualmente. En el caso del BN, esto es de particular relevancia en instalaciones costa afuera, donde todo el equipo de fondo, excepto las válvulas, se instala durante la terminación del pozo; en campos terrestres, también deberá considerarse el sistema de BN en el dimensionamiento y ubicación de las líneas de inyección, de recolección, así como de la infraestructura superficial. A continuación, se describen algunas consideraciones pertinentes para el diseño de los sistemas de BN.

### 1.5.1 Tipos de instalaciones

Dependiendo la terminación del pozo, existen tres tipos de instalaciones en los sistemas de BN: abierta, semi-cerrada y cerrada, como se ilustra en la **Figura 1.14**. En la instalación abierta (**Figura 1.14A**), no hay empacador ni válvula de pie en la TP; la instalación semi-cerrada (**Figura 1.14B**), tiene empacador debajo de la válvula de inyección más profunda, y no tiene válvula de pie; finalmente, en la instalación cerrada (**Figura 1.14C**), hay empacador debajo de la válvula de inyección más profunda, así como válvula de pie.



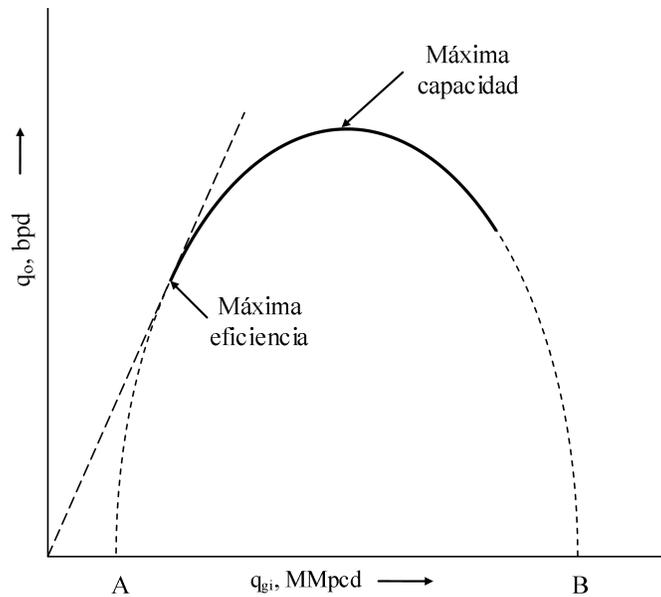
**Figura 1.13** Tipos de instalaciones de los sistemas de bombeo neumático.

### 1.5.2 Optimización del gasto de inyección

Uno de los objetivos principales en la implementación de cualquier sistema artificial es maximizar el valor neto del aceite producido; para alcanzar esta meta con un sistema de BN, será necesario tener plena disponibilidad de gas en todo momento y optimizar el gasto de inyección. Al respecto, en la **Figura 1.14** se muestra el comportamiento típico del gasto de aceite contra el gasto de BN.

Con referencia a la **Figura 1.14**, Shaw (1949) explica que habrá poca o ninguna producción de aceite hasta que el gasto del gas de inyección sea suficiente para desplazar los fluidos en la sarta de producción (punto A en la **Figura 1.14**); en estas condiciones, el flujo estará dominado por la carga hidrostática. Ahora bien, al continuar incrementado el gasto de inyección, eventualmente se alcanza un valor en que se obtiene el gasto máximo de aceite. Más allá de este punto, la producción del aceite se reducirá con el incremento del gasto de inyección debido a que el flujo estará dominado por la fricción.

A partir de estos resultados, es importante destacar el punto correspondiente al gasto máximo de aceite no necesariamente corresponde al punto óptimo de operación del sistema. Para determinarlo, adicionalmente a los estudios técnicos habrá que realizar análisis económicos. Finalmente, conviene mencionar que los ingenieros deberán monitorear los pozos regularmente con la finalidad de tomar las medidas pertinentes de manera oportuna para mantener la producción optimizada.



**Figura 1.14** Efecto del gas de inyección en la producción de aceite.

### 1.5.3 Requerimientos de compresión

La eficiencia en las operaciones de BN depende principalmente de la presión del gas de inyección (Blann y Williams, 1984), la cual a su vez depende del gasto de aceite, el corte de agua, la contrapresión en la cabeza del pozo, gasto y densidad del gas de inyección y el diseño del pozo e instalaciones superficiales de producción. Todos estos factores inciden en los requerimientos de compresión y, por lo tanto, en la rentabilidad del BN. En este sentido, los costos de inversión se incrementan si la presión de inyección es demasiado alta; por otro lado, si la presión de inyección es demasiado baja puede resultar en operaciones ineficientes y baja productividad del pozo.

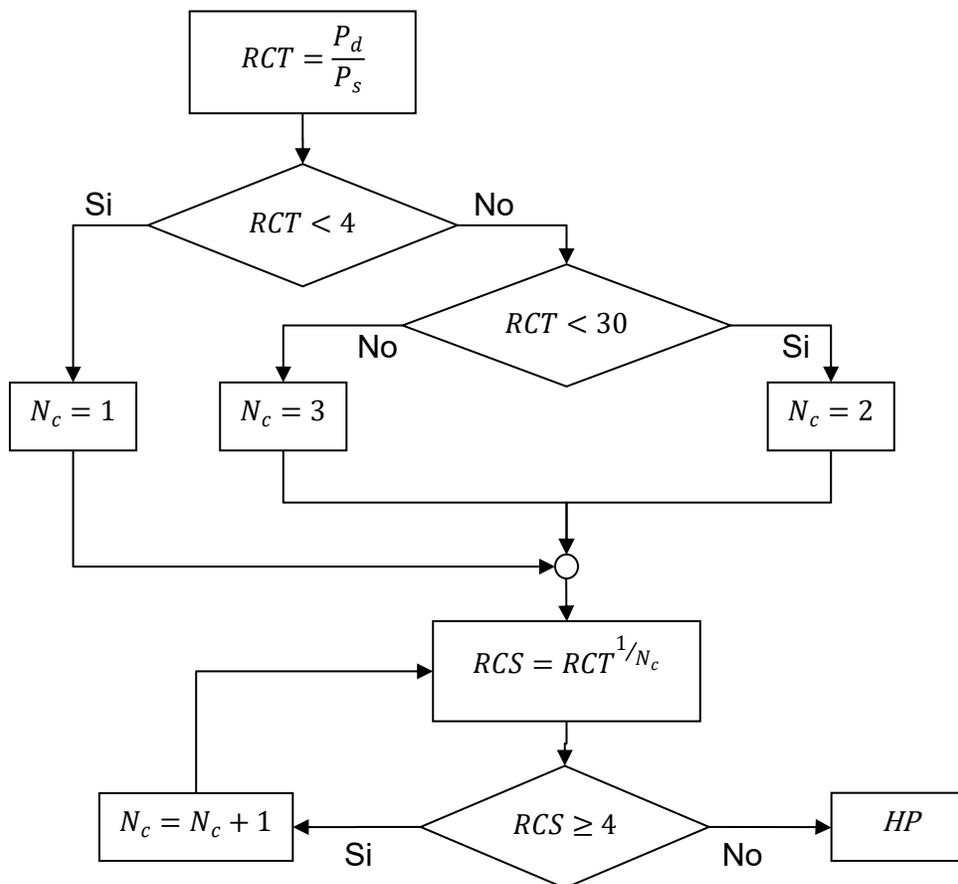
La potencia teórica de compresión puede estimarse mediante la siguiente **ecuación 1.13** (Kennedy, 1967)

$$HP = 44.5 N_c \left( RCS^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \left( \frac{k}{k-1} \right) q_{gi} \frac{F_s}{E_c}, \quad (1.13)$$

donde:

$$RCS = \left(\frac{P_d}{P_s}\right)^{1/N_c}. \quad (1.14)$$

La relación de compresión, RCT, se define como la presión de descarga,  $P_d$ , entre la presión de succión,  $P_s$ . Para calcular dicha relación es necesario realizar un procedimiento iterativo, como se indica en la **Figura 1.15**



**Figura 1.15** Procedimiento iterativo para calcular la potencia de compresión.

#### 1.5.4 Modelo integrado

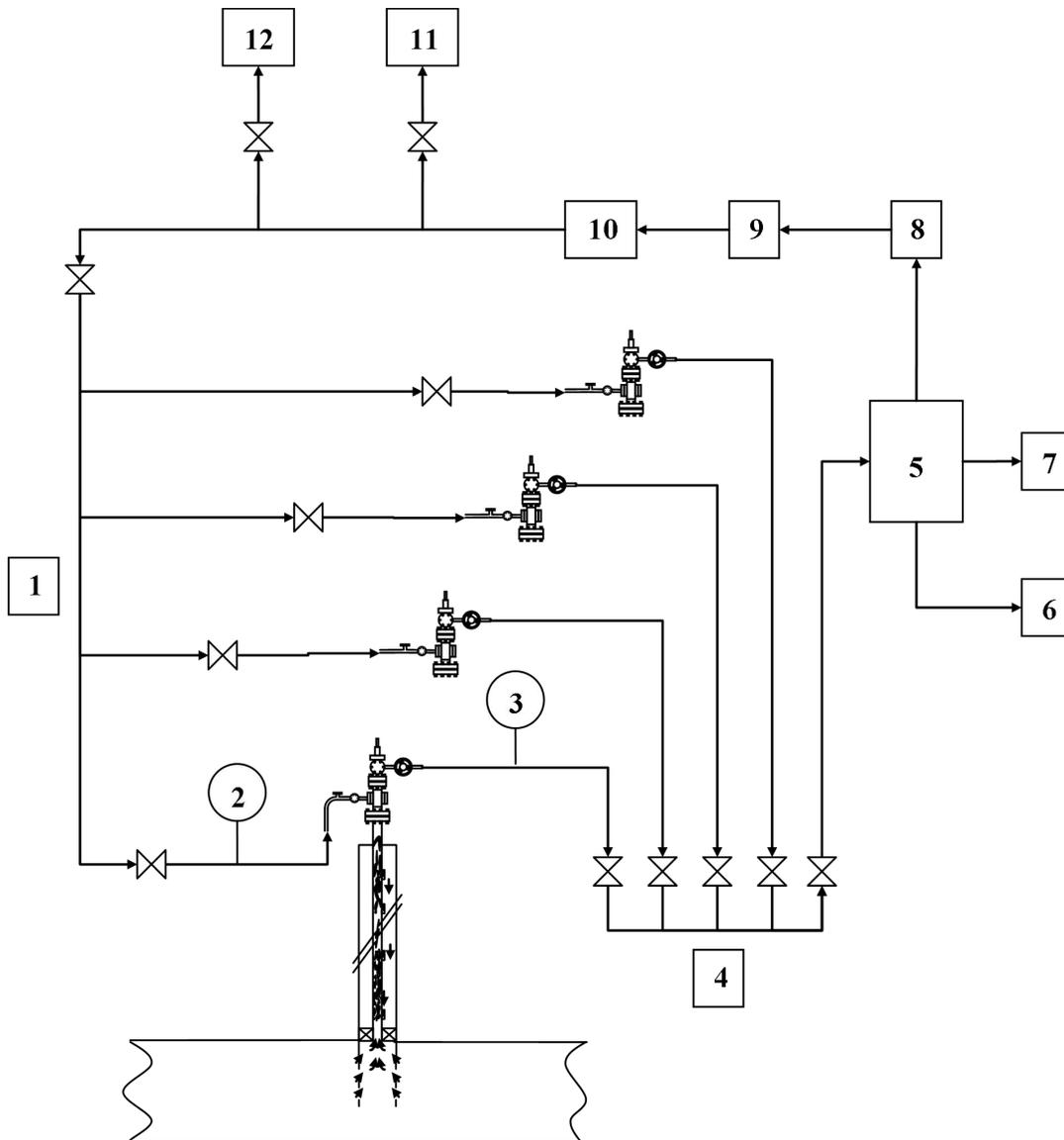
Cuando más de un pozo está produciendo y hay una cantidad insuficiente de gas de inyección disponible, éste se asigna comparando el incremento en la producción respecto al incremento en gas de inyección. Para ello se debe desarrollar un modelo teórico computacional que describa del rendimiento de un pozo individual y la posterior calibración de dicho modelo con datos reales de campo bajo diferentes esquemas de producción.

Una vez que se cuenta con los modelos de pozos individuales, éstos se integran en un modelo de todo el sistema, el cual incluye al yacimiento, los elementos relevantes del sistema de inyección y las instalaciones superficiales. Algunos de estos elementos se muestran esquemáticamente en la **Figura 1.16**, y son los siguientes:

- |  |  |
|--|--|
| 1) Múltiple de inyección                           | 7) Aceite a almacenamiento               |
| 2) Medición de presión y gasto de gas de inyección | 8) Gas                                   |
| 3) Medición de presión y gasto de producción       | 9) Estación de compresión                |
| 4) Múltiple de producción                          | 10) Unidad de deshidratación del gas     |
| 5) Separador trifásico                             | 11) Venta de gas excedente               |
| 6) Agua residual                                   | 12) Suministro de gas en caso de déficit |

Una vez conformado el modelo integral del sistema, sus predicciones deberán compararse contra datos reales de producción; en caso de encontrar discrepancias, deberán realizarse ajustes finos en los elementos del modelo según resulte necesario. Con la finalidad de construir y mantener actualizado el modelo, es claro que debe implementarse un plan sistemático de recopilación, validación y administración de datos de campo; de esta manera, será posible identificar cualquier desviación de la operación óptima del sistema y tomar las acciones correctivas pertinentes de manera oportuna.

Finalmente, en las **Tablas 1.1 a 1.3**, se resumen los principales factores a ser considerados cuando se diseña/evalúa un sistema de bombeo neumático; se mencionan los principales elementos en costos de inversión, las principales consideraciones en costos operativos, y algunas consideraciones de diseño, respectivamente (Forero et al. 1993).



**Figura 1.16** Esquema de un sistema integral de producción con BN.

YACIMIENTO		POZO	INSTALACIONES SUPERFICIALES		
Comportamiento	Predicciones	Comportamiento del Pozo	Inyección de Gas	Sistema de Contrapresión	Inyección de Gas
Volúmenes.	Pronósticos de producción.	Afluencia.	Presión.	Comportamiento de la línea de flujo.	Presión de descarga.
Mecanismos de empuje.	Pronósticos de declinación de presión.	TP: diámetro, longitud, presión en la cabeza.	Volumen. Profundidad.	Presión del separador.	Calidad del gas.

**Tabla 1.1** Consideraciones de diseño (Modificada de Forero et al. 1993).

YACIMIENTO	POZO	INSTALACIONES SUPERFICIALES	
Estudios de Yacimiento y Adquisición de Datos	Pozo y Equipo de Terminación	Instalaciones de Bombeo Neumático	
Núcleos/Registros.	Diseño del pozo y la terminación.	Instalaciones de procesamiento.	Medición y control.
Estudios de simulación.	Costos de terminación.	Compresión.	Sistema de distribución.
	Simple vs. Doble.	Manejo de agua.	Quemadores.

**Tabla 1.2** Principales elementos en costos de inversión (Modificada de Forero et al. 1993).

YACIMIENTO	POZO		INSTALACIONES SUPERFICIALES
Observación del Yacimiento	Observación del Pozo	Intervención del pozo	Costos de mantenimiento
Adquisición de datos.	Adquisición de datos.		Combustible del compresor. Rendimiento del compresor (Seguridad).
Soporte técnico.	Integridad de la terminación.	Frecuencia de reparaciones.	
Estudios de simulación.	Eficiencia.	Componente de seguridad.	

**Tabla 1.3** Principales consideraciones en costos operativos (Modificada de Forero et al. 1993).

## Capítulo 2

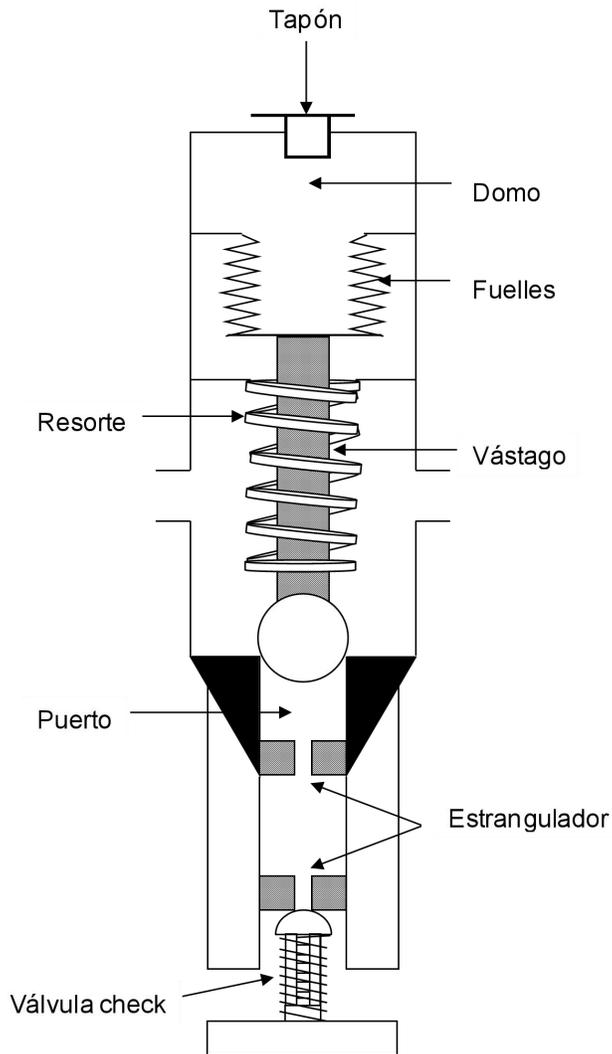
# Válvulas subsuperficiales

En este capítulo se presenta una clasificación general de válvulas de inyección, su mecánica de apertura y cierre a condiciones operativas y en banco de calibración a condiciones estándar y se dan ejemplos de dichas operaciones. También se muestran los mandriles más comunes y las posibles combinaciones de mandril-válvula, las cuales dependen del tipo de flujo para el que fueron proyectados, ya sea por TP o por espacio anular.

### 2.1 Válvulas de bombeo neumático

En las primeras aplicaciones del BN se inyectaba gas para vencer la presión de fondo en la TP, pero ello requería muy altas presiones para desplazar los fluidos del espacio anular hacia la TP y comenzar la producción del pozo. En este sentido, para alcanzar la máxima profundidad de inyección al tiempo que se minimizan los requerimientos de compresión, es necesario descargar el conducto inyectando gas en puertos cada vez más profundos, y contar con un medio para abrirlos o cerrarlos.

Las válvulas de bombeo neumático son las herramientas para tal propósito, y se diseñan esencialmente para abrir o cerrar en función de la presión del gas de inyección o, de la presión de los fluidos de producción. La **Figura 2.1** muestra esquemáticamente los elementos mecánicos de una válvula típica de BN: domo, fuelles, resorte, puerto, estrangulador, válvula check.



**Figura 2.1** Válvula de bombeo neumático.

Con referencia a la **Figura 2.1**, el domo es una cámara que se carga con nitrógeno a través del tapón. Los fuelles conectados al domo permiten la expansión o contracción del volumen de nitrógeno, y transmiten el movimiento al vástago, el cual está empotrado con una bola que cierra el flujo de gas a través de válvula al ser empujada contra su asiento en la parte superior del puerto.

Por otra parte, el resorte previene el daño a los fuelles cuando éstos son expuestos a fuerzas mayores que la generada por la carga de nitrógeno. En cuanto a los estranguladores, éstos regulan el volumen máximo de gas que pasa a través de la válvula. Finalmente, la válvula check impide el contraflujo desde el pozo hacia la válvula y el conducto de inyección.

En términos generales, las válvulas de BN se pueden clasificar según los siguientes tres criterios:

- 1) Dependiendo de la presión que provee la principal fuerza de apertura, las válvulas se conocen como: *operadas por presión del gas de inyección (IPO, Injection Pressure Operated*, por su nomenclatura API), y *operadas por presión de los fluidos de producción (PPO, Production Pressure Operated)*
- 2) Dependiendo de la dirección del flujo de gas, las válvulas pueden diseñarse para: *flujo por TP*, y *flujo por espacio anular*.
- 3) También dependiendo del tipo de mandril para el cual han sido proyectadas, las válvulas pueden ser: *recuperables*, o *permanentes*.

Las válvulas pueden ser balanceadas o desbalanceadas. Se dice que una válvula es desbalanceada si su presión de apertura y/o de cierre es influenciada por la presión de producción en la TP. En contraste, una válvula balanceada abre y cierra a la misma presión de inyección.

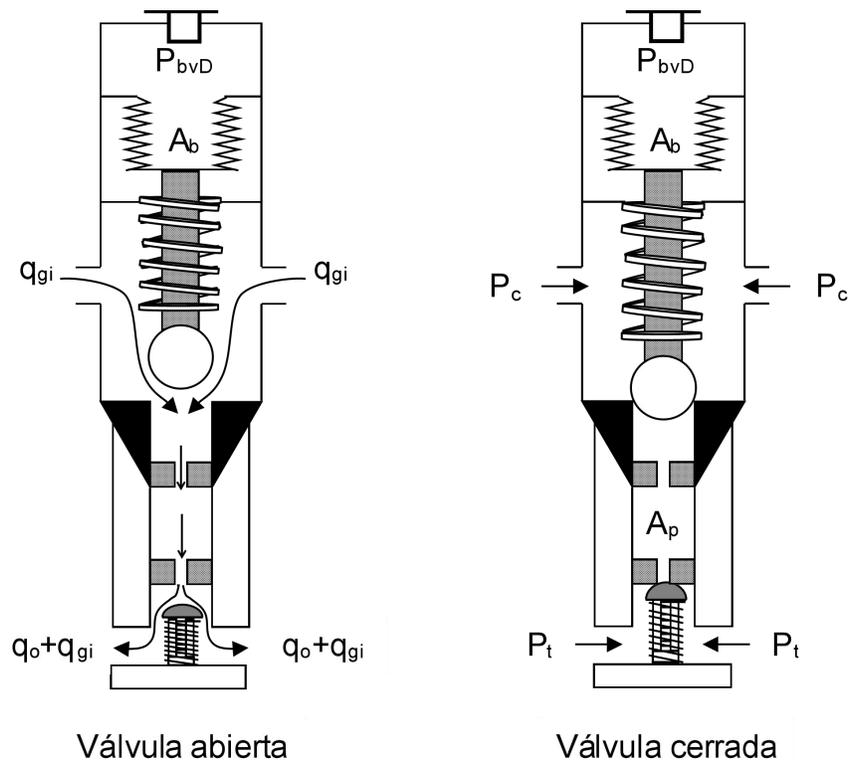
## **2.2 Mecánica de válvulas**

Para cada configuración de válvula, las ecuaciones de apertura y cierre se determinan haciendo un balance de las fuerzas que actúan para operarla y así calibrar la presión de apertura o cierre requerida. En el momento de cierre, o al momento de apertura, la ecuación general de balance de fuerzas en la válvula es:

$$\sum F_{apertura} = \sum F_{cierre}$$

### 2.2.1 Válvulas operadas por presión de inyección IPO

En este tipo de válvula, la principal fuerza de apertura es generada por la presión del gas de inyección a la profundidad de la válvula. En la **Figura 2.2** se ilustra una válvula IPO típica. Este tipo de válvulas se cierran al reducir la presión del gas de inyección en el espacio anular ( $P_c$ ); esto permite que la válvula permanezca cerrada incluso si la presión de producción en la TP ( $P_t$ ) se incrementa subsecuentemente. En la posición abierta, dependiendo de la presión de los fuelles y el tamaño del estrangulador, la válvula IPO puede mostrar alguna susceptibilidad a la presión de producción ( $P_t$ ).



**Figura 2.2** Válvula operada por presión de inyección, IPO.

Ecuación de apertura de una válvula IPO.

Mientras que las fuerzas de la presión en el domo y el resorte hacen que la válvula cierre, las fuerzas debidas a la presión del gas de inyección y presión de los fluidos de producción,  $P_c$  y  $P_t$  respectivamente, hacen que la válvula abra. Las componentes de la fuerza de apertura  $F_o$  son:

$$\begin{aligned} F_{o1} &= P_c (A_b - A_p), \\ F_{o2} &= P_t A_p. \end{aligned} \tag{2.1}$$

En tanto que las componentes de la fuerza de cierre  $F_c$  son:

$$\begin{aligned} F_{c1} &= P_{bvD} A_b, \\ F_{c2} &= S (A_b - A_p). \end{aligned} \tag{2.2}$$

Aplicando la ecuación general de apertura y cierre:

$$P_c (A_b - A_p) + P_t A_p = P_{bvD} A_b + S (A_b - A_p). \tag{2.3}$$

La **ecuación 2.3** es para una válvula con fuelles cargados y resorte. En una válvula sin resorte,  $S = 0$ .

Dividiendo la **ecuación 2.3** entre  $A_b$ , se obtiene:

$$P_c \left(1 - \frac{A_p}{A_b}\right) + P_t \frac{A_p}{A_b} = P_{bvD} + S \left(1 - \frac{A_p}{A_b}\right). \tag{2.4}$$

Si  $R = A_p / A_b$  sustituyendo en la **ecuación 2.4** queda:

$$P_c (1 - R) + P_t R = P_{bvD} + S (1 - R). \tag{2.5}$$

Finalmente, y dado que una válvula IPO es más sensible a la presión de inyección del gas, la presión de apertura a la profundidad de la válvula,  $P_{voD}$  es igual a  $P_c$ . Luego entonces, resolviendo para  $P_{voD}$ , se tiene que:

$$P_{voD} = P_{bvD} \frac{1}{1-R} - P_t \frac{R}{1-R} + S. \quad (2.6)$$

El segundo miembro del lado derecho en la **ecuación 2.6** al cociente  $R/(1-R)$  se llama *Factor de Presión-Producción*,  $F_{pp}$ , y al producto de  $P_t$  y  $F_{pp}$  se conoce como *Efecto de Presión-Producción*,  $E_{pp}$ .

$$F_{pp} = \frac{R}{1-R}, \quad (2.7)$$

$$E_{pp} = P_t F_{pp}, \quad (2.8)$$

$$P_{voD} = \frac{P_{bvD}}{1-R} - E_{pp} + S. \quad (2.9)$$

El efecto de presión-producción representa la magnitud en que se reduce la presión de apertura  $P_c$  como resultado de la asistencia de  $P_t$ .

#### Ecuación de cierre de una válvula IPO.

Con referencia a la **Figura 2.2** los componentes que tienden a mantener la válvula abierta son:

$$F_{o1} = P_c (A_b - A_p),$$

$$F_{o2} = P_c A_p. \quad (2.10)$$

Por otra parte, las componentes de la fuerza que tienden a cerrar la válvula son:

$$F_{c1} = P_{bvD} A_b,$$

$$F_{c2} = S (A_b - A_p). \quad (2.11)$$

Igualando la suma de las ecuaciones de apertura y suma de ecuaciones de cierre, se tiene que:

$$P_c (A_b - A_p) + P_c A_p = P_{bvD} A_b + S (A_b - A_p). \quad (2.12)$$

Como ya se mencionó, en una válvula IPO la presión de cierre es más sensible a la presión de inyección, por lo que resolviendo para  $P_c$  tenemos que la presión de cierre a la profundidad de la válvula  $P_{vcD}$  es:

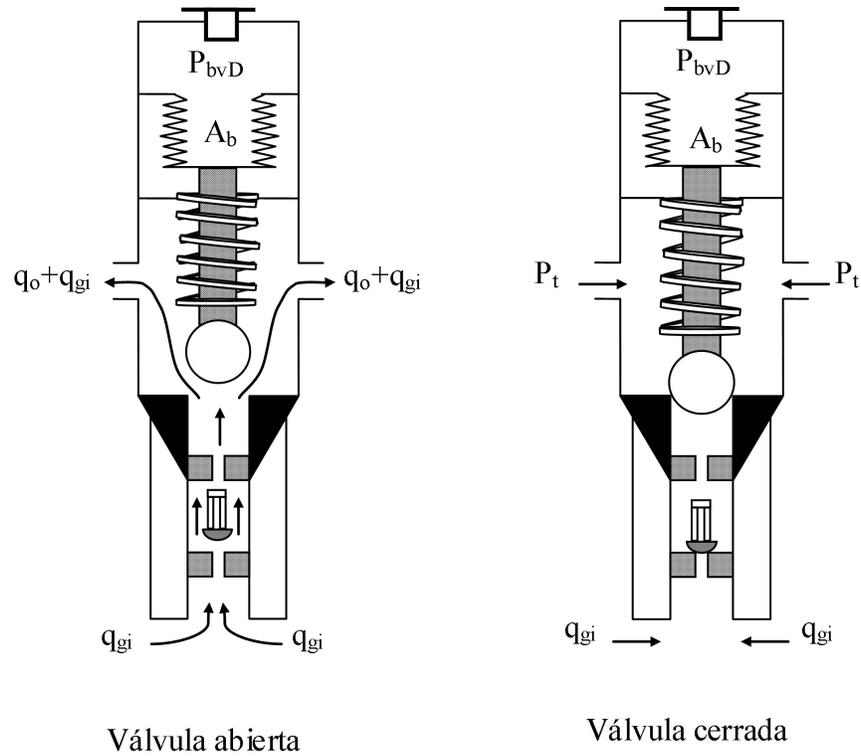
$$P_{vcD} = P_{bvD} + S (1 - R). \quad (2.13)$$

Como puede verse en la **ecuación 2.13**, la válvula cierra cuando la presión de inyección disminuye por debajo de la presión en los fuelles.

Cabe mencionar que las válvulas IPO solamente con resorte se emplean en pozos con temperatura de producción muy alta o cuando el perfil de temperatura es muy difícil de predecir. En este tipo de válvulas para los cálculos mostrados anteriormente, se asume que el efecto de la fuerza del resorte actúa sobre el área total de los fuelles  $A_p$ .

### 2.2.2 Válvulas operadas por presión de producción PPO

En las válvulas PPO, la principal fuerza de apertura es generada por la presión del fluido en el conducto de producción a la profundidad de la válvula. Los elementos principales de este tipo de válvula se muestran en la **Figura 2.3**. Como puede observarse, la válvula tipo IPO es idéntica a la PPO con la diferencia que, en ésta última, la presión de los fluidos de producción actúa sobre el área mayor de los fuelles mientras que la presión de inyección actúa sobre el área del puerto. Por esta misma razón, la válvula check está invertida.



**Figura 2.3** Válvula operada por presión de producción, PPO.

Ecuación de apertura de una válvula PPO.

Definiendo la presión de apertura en términos de la  $P_t$ , las fuerzas de apertura y cierre de una válvula PPO pueden expresarse, respectivamente, como:

$$\sum F_o = P_t (A_b - A_p) + P_c A_p, \quad (2.14)$$

$$\sum F_c = P_{bvD} A_b + S (A_b - A_p). \quad (2.15)$$

Igualando la **ecuación 2.14** con la **ecuación 2.15**, y dividiendo entre  $A_b$ , se tiene que:

$$P_t \left(1 - \frac{A_p}{A_b}\right) + P_c \frac{A_p}{A_b} = P_{bvD} + S \left(1 - \frac{A_p}{A_b}\right). \quad (2.16)$$

La presión de apertura de una válvula PPO es la presión de los fluidos de producción necesaria para abrir la válvula, por lo tanto, resolviendo la ecuación 2.16 para  $P_t$  y recordando que  $A_p / A_b = R$ , se tiene que la presión de apertura,  $P_{voD}$ , puede expresarse como:

$$P_{voD} = P_{bvD} \frac{1}{1-R} - P_c \frac{R}{1-R} + S. \quad (2.17)$$

En la ecuación apertura de una válvula PPO, el término  $R/(1-R)$  se denomina en éste caso como *Factor de Presión-Inyección*,  $F_{pi}$ , y al producto de  $P_c$  y  $F_{pi}$  se le llama *Efecto de Presión-Inyección*,  $E_{pi}$

$$F_{pi} = \frac{R}{1-R}, \quad (2.18)$$

$$E_{pi} = P_c F_{pi}, \quad (2.19)$$

$$P_{voD} = \frac{P_{bvD}}{1-R} - E_{pi} + S. \quad (2.20)$$

El  $E_{pi}$  se resta de la presión requerida para abrir la válvula; de esta manera, conforme la  $P_c$  aumenta, la  $P_{voD}$  disminuye.

#### Ecuación de cierre de una válvula PPO.

Una vez abierta una válvula PPO, las fuerzas que tienden a mantenerla en dicha posición son:

$$F_{o1} = P_t (A_b - A_p),$$

$$F_{o2} = P_t A_p. \quad (2.21)$$

En tanto que las fuerzas que tienden a cerrarla son:

$$F_{c1} = P_{bvD} A_b,$$

$$F_{c2} = S (A_b - A_p). \quad (2.22)$$

Luego entonces, haciendo un balance de fuerzas de apertura y cierre:

$$P_t (A_b - A_p) + P_t A_p = P_{bvD} A_b + S (A_b - A_p). \quad (2.23)$$

Finalmente, resolviendo para  $P_t$  la ecuación de cierre para una válvula PPO es la siguiente:

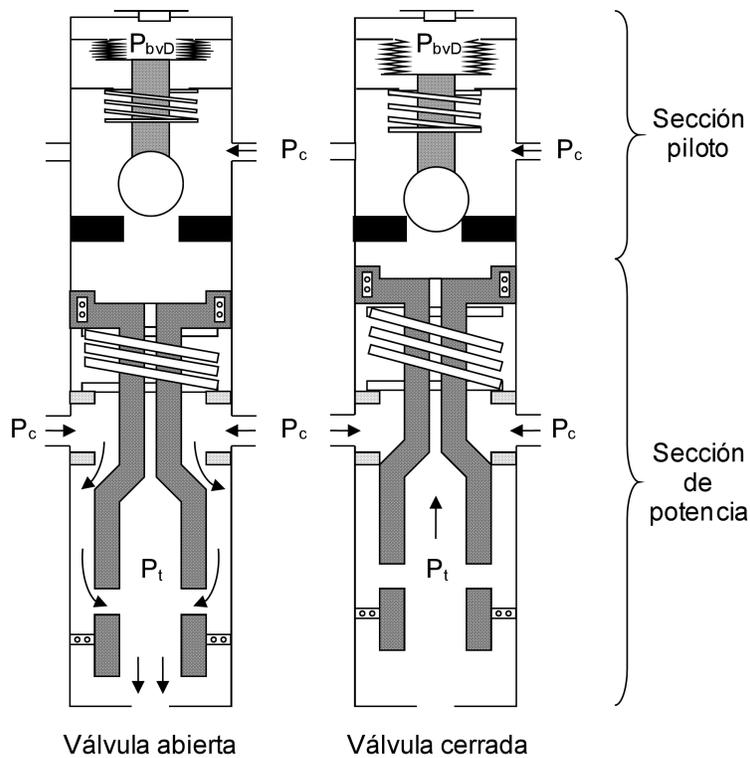
$$P_{vcD} = P_{bvD} + S (1 - R). \quad (2.24)$$

Las válvulas PPO más usadas son las de resorte en las que el domo contiene un líquido amortiguador sellado a presión atmosférica.

### 2.2.3 Válvulas piloto

Las válvulas piloto se emplean cuando son necesarios altos gastos de inyección de gas; estas válvulas son operadas por un incremento en la presión de inyección y se usan frecuentemente en instalaciones de bombeo neumático intermitente. Dado que las válvulas piloto son válvulas tipo IPO de doble elemento, las ecuaciones de apertura y cierre son válidas para ambas. La **Figura 2.4** muestra los componentes típicos de una válvula piloto.

Con referencia a la **Figura 2.4**, cuando se vence la presión en los fuelles, la porción piloto de la válvula permite que la presión en el espacio anular actúe sobre un pistón; esto hace que se mueva la sección de potencia de la válvula y así pueda fluir una cantidad mayor de gas desde los puertos más amplios en la sección de potencia hacia el pozo; posteriormente, la sección de potencia se cierra por la acción del resorte conforme la  $P_c$  se reduce y la sección piloto se cierra de forma normal.

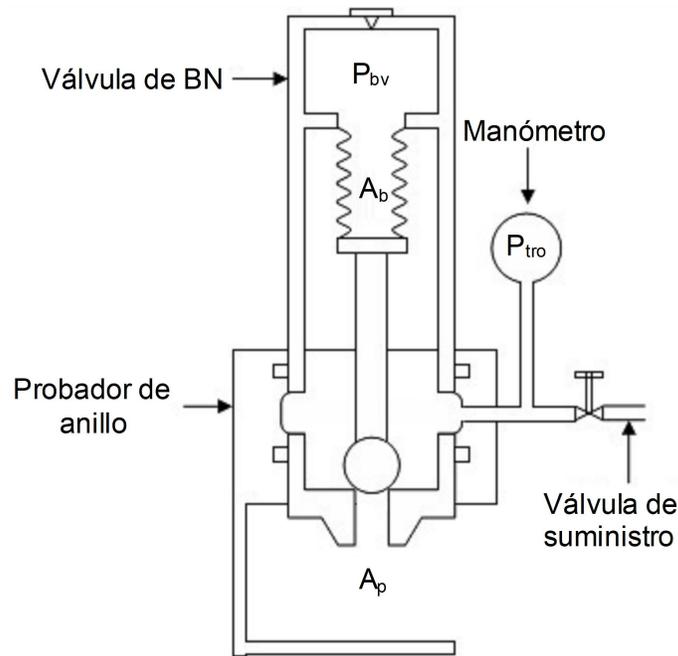


**Figura 2.4** Válvula piloto.

## 2.3 Calibración de válvulas

Hoy en día, la mayoría de las válvulas de BN son de fuelle o una combinación de fuelle y resorte. Toda vez que el volumen del nitrógeno dentro de los fuelles es aproximadamente constante, su presión varía en función de la temperatura. A fin de tener una temperatura consistente y repetible a la cual ajustar la presión del nitrógeno dentro de los fuelles, las válvulas se sumergen en agua a 60 °F durante el proceso de calibración.

En la **Figura 2.5** se presenta un banco de calibración de válvulas de BN. Para determinar la presión inicial de apertura, se inyecta gas en la válvula de suministro a un gasto muy bajo hacia el probador de anillos en tanto que el área del puerto está expuesto a la presión atmosférica. La válvula inicialmente está cerrada y empieza a abrir cuando la fuerza de apertura es ligeramente mayor que la fuerza de cierre.



**Figura 2.5** Banco de calibración de válvulas de BN.

Aplicando las ecuaciones de la mecánica de las válvulas al arreglo mostrado en la **Figura 2.5**, se tiene que:

$$P_{tro}(A_b - A_p) = P_{bv} A_b.$$

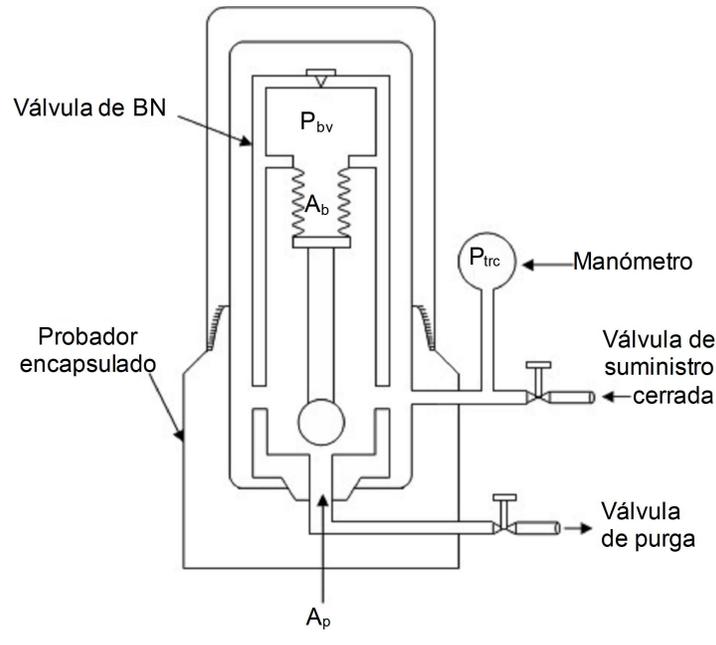
Por lo que la presión de apertura en banco de calibración es:

$$P_{tro} = \frac{P_{bv}}{1-R}. \quad (2.25)$$

En el caso de que la válvula tuviera además un resorte, se debe sumar el efecto del resorte en el lado derecho de la **ecuación 2-25**.

La presión de cierre es más difícil de establecer que la presión de apertura y puede estar afectada por la disminución de la presión durante el purgado en el probador. Por lo tanto, se emplea un probador encapsulado en lugar de uno de anillo; esto con el fin de que cualquier fuga de gas en la tubería del probador no impida la observación de la verdadera presión de cierre. Esta presión se nota cuando la presión corriente abajo

continúa disminuyendo mientras la presión corriente arriba permanece constante; ambas presiones son idénticas en el instante en que la válvula cierra.



**Figura 2.6** Presión de cierre en banco de calibración.

Aplicando las ecuaciones de balance de fuerza al arreglo mostrado en la **Figura 2.6**, se tiene que:

$$P_{trc} (A_b - A_p) + P_{trc} A_p = P_{bv} A_b ,$$

$$P_{trc} = P_{bv}. \tag{2.26}$$

Si la válvula tiene resorte además de los fuelles cargados, se suma  $S(1-R)$  en el lado derecho de la **ecuación 2.26**.

Debido a que las válvulas en condiciones operativas están a una temperatura mayor que durante la calibración, es necesario realizar algunas correcciones por el efecto de esta variable; de esta manera, la presión de los fuelles agujero abajo  $P_{bvD}$  debe ser convertida a la presión de los fuelles  $P_{bv}$  a 60 °F mediante la siguiente relación:

$$P_{bv} = C_T P_{bvD}. \quad (2.27)$$

La presión del nitrógeno a condiciones del banco de calibración,  $P_{bv}$ , se calcula a partir de la presión de los fuelles a condiciones operativas,  $P_{bvD}$ , mediante la siguiente correlación (Winkler and Eads, 1989)

$$P_{bv} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} - P_{atm}. \quad (2.28)$$

Si  $520 * P_{bvD} / (T_{bvD} + 460) < 1250$ , se tiene que:

$$\begin{aligned} A &= 3.054 \times 10^{-7} T, \\ B &= 1 + 1.934 \times 10^{-3} T, \\ C &= -2.26 \times 10^{-3} T. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Por otra parte, cuando  $520 * P_{bvD} / (T_{bvD} + 460) \geq 1250$ :

$$\begin{aligned} A &= 1.84 \times 10^{-7} T, \\ B &= 1 + 2.298 \times 10^{-3} T, \\ C &= -0.267 T - P. \end{aligned} \quad (2.30)$$

donde  $P = P_{bvD} + P_{atm}$  y  $T = T_{bvD} - 60$ .

Las ecuaciones de apertura y cierre en banco de calibración también aplican a válvulas cargadas con resorte; el efecto de la fuerza del resorte reemplaza la presión de los fuelles como fuerza de cierre y en este caso no aplica una corrección por temperatura.

Una vez que se han establecido las presiones de apertura o cierre en banco de calibración, la válvula se coloca en un recipiente lleno con agua a alta presión donde es corrida completamente varias veces aumentando y disminuyendo alternadamente la presión del agua confinada en el recipiente. Los rangos máximos de presión varían entre 3000 y 5000 lb/pg<sup>2</sup> en tanto que el número mínimo de ciclos es entre 5 y 10.

Luego, se remueve la válvula del recipiente y se revisa de nuevo la  $P_{tro}$ , si su variación es mayor que la tolerancia establecida, la válvula debe ser recalibrada y el procedimiento se repite hasta que la  $P_{tro}$  se estabiliza.

### Ejemplos

Considérese una presión de inyección  $P_c = 1250 \text{ lb/pg}^2$  y una presión de producción  $P_t = 425 \text{ lb/pg}^2$ . La temperatura de la válvula es  $T_{vD} = 180 \text{ }^\circ\text{F}$ , diámetro de puerto de 3/16 de pulgada y  $A_b = 0.77 \text{ lb/pg}^2$ . Determinar:

- 1)  $P_{tro}$  para válvula IPO cargada con nitrógeno, sin resorte.
- 2)  $P_{tro}$  para válvula IPO cargada con nitrógeno, con un resorte ( $S = 300$ ).
- 3)  $P_{tro}$  para válvula IPO cargada con resorte.
- 4)  $P_{tro}$  para válvula PPO cargada con nitrógeno, sin resorte.

### Solución

Con el diámetro de puerto y el área de fuelles, se determina R:

$$A_p = \frac{\pi}{4} \left( \frac{3}{16} \right)^2 = 0.028 \text{ pg}^2.$$

Por lo tanto:

$$R = \frac{0.028}{0.77} = 0.036.$$

1. Resolviendo la ecuación 2.5 para  $P_{bvD}$ :

$$P_{bvD} = 1250 (1 - 0.036) + 425 (0.036) = 1220.3 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2}.$$

Con las **ecuaciones 2.28 a 2.30**, se calcula la presión de los fuelles a condiciones de calibración, de donde se obtiene que:

$$P_{bv} = 959.7 \frac{lb}{pg^2}.$$

Por último, se aplica la **ecuación 2.25**, y se tiene que:

$$P_{tro} = \frac{959.7}{1-0.036} = 995.5 \frac{lb}{pg^2}.$$

2. Se sigue el mismo procedimiento que en el caso anterior, pero ahora tomando en cuenta el efecto del resorte  $S = 300 \text{ lb/pg}^2$

$$P_{bvD} = 1250 (1 - 0.036) + 425 (0.036) - 300(1 - 0.036) = 931.1 \frac{lb}{pg^2}.$$

Usando la **ecuación 2.25** y sumando el efecto del resorte:

$$P_{tro} = \frac{931.1}{1-0.036} = 1063.9 \frac{lb}{pg^2}.$$

3. En este caso,  $P_{bvD} = 0$ , además se considera que el efecto del resorte actúa sobre el área completa de los fuelles, por lo que al hacer un balance de fuerzas de apertura y cierre la presión ejercida por el resorte, se tiene que:

$$S = P_c (1 - R) + P_t R = 1250 (1 - 0.036) + 425 (0.036) = 1220.3 \frac{lb}{pg^2}.$$

La presión de apertura en banco de calibración está dada por:

$$P_{tro} = \frac{S}{1-R} = \frac{1220.3}{1-0.036} = 1265.8 \frac{lb}{pg^2}.$$

Nótese que la presión de apertura para una válvula cargada con resorte es mayor que para las cargadas de nitrógeno bajo las mismas condiciones operativas.

4. Resolviendo la **ecuación 2.16** para  $P_{bvD}$  con  $S = 0$ , se calcula:

$$P_{bvD} = 425 (1 - 0.036) + 1250 (0.036) = 454.7 \frac{lb}{pg^2}.$$

Ahora con las **ecuaciones 2.28 a 2.30**:

$$P_{bv} = 362.3 \frac{lb}{pg^2}.$$

Finalmente, con la **ecuación 2.25**, la presión de apertura es:

$$P_{tro} = \frac{362.3}{1-0.036} = 375.8 \frac{lb}{pg^2}.$$

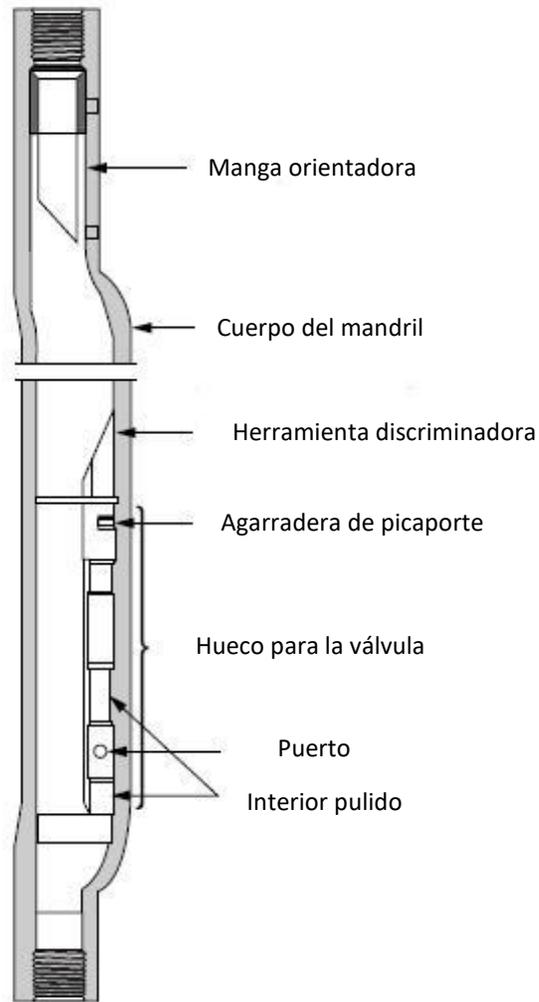
## 2.4 Mandriles

La mayoría de las instalaciones emplean mandriles de hueco lateral instalados en la sarta de producción a las profundidades apropiadas como parte permanente de la terminación; de esta manera, las válvulas pueden instaladas y recuperadas sin necesidad de extraer la tubería mediante operaciones con línea de acero.

La **Figura 2.7** muestra una vista esquemática de un mandril de hueco lateral. Sus partes principales son las siguientes:

- 1) Una manga orientadora que contiene un una ranura vertical que ajusta en un trinquete sobre la herramienta de inserción de tal manera que ésta y la junta articulada estén correctamente alineadas con la orientación del hueco. Esto permite insertar o recuperar la válvula dentro del mandril de forma apropiada.
- 2) Una herramienta discriminadora la cual guía a la válvula de BN dentro del hueco desviando las herramientas de mayor diámetro hacia a la tubería principal.
- 3) Un anillo en la válvula que cierra por debajo del picaporte del mandril, asegurando la válvula en su lugar. Esto previene que la válvula se separe del mandril una vez que el pozo está produciendo.

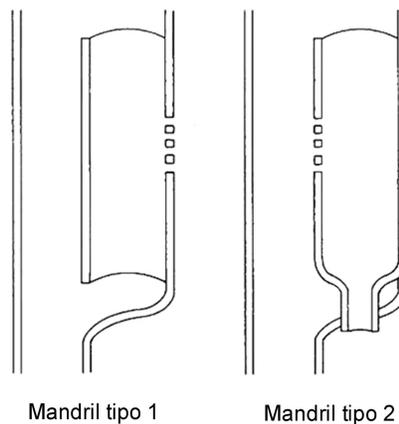
- 4) Sellos de fluido ajustados entre los elementos de sello de la válvula y el interior pulido del hueco. Estos se ubican arriba y abajo del puerto de la TR para válvulas IPO o en el puerto de la TP para válvulas PPO.



**Figura 2.7** Elementos de un mandril de hueco lateral.

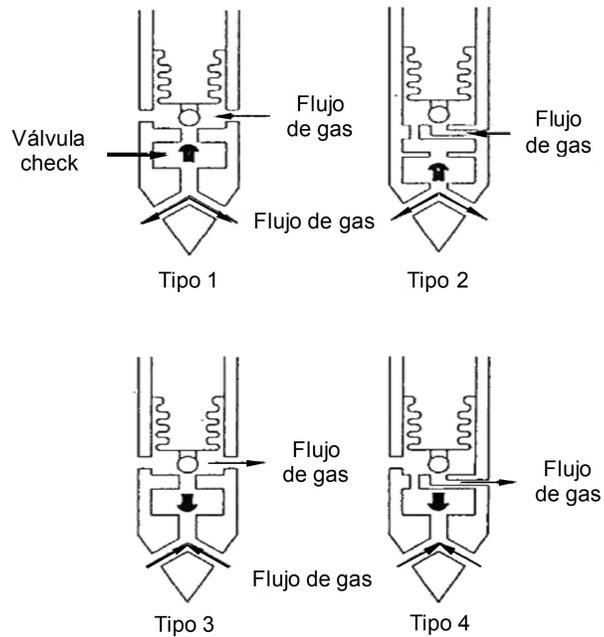
### 2.3.1 Combinación de mandril y portaválvulas

Los diferentes tipos de mandriles y la posibilidad de tener flujo por TP o por espacio anular hace que las válvulas tengan diferentes configuraciones internas para adaptarse a cada combinación de condiciones operativas. Por lo tanto, resultaría ineficiente usar una combinación de mandril y porta válvulas para todos los requerimientos de diseño de una instalación de bombeo neumático. En este contexto, existen dos configuraciones básicas de mandriles (**Figura 2.8**) y cuatro configuraciones de válvulas (**Figura 2.9**).



**Figura 2.8** Tipos básicos de mandriles para BN.

Con respecto a las cuatro configuraciones de válvulas se muestran en la **Figura 2.9**, el tipo 1 es una válvula IPO convencional y el tipo 2 es una válvula PPO. Los otros dos tipos no son tan conocidos, pero puede mencionarse que su única diferencia con los tipos 1 y 2 es que la válvula check está invertida.

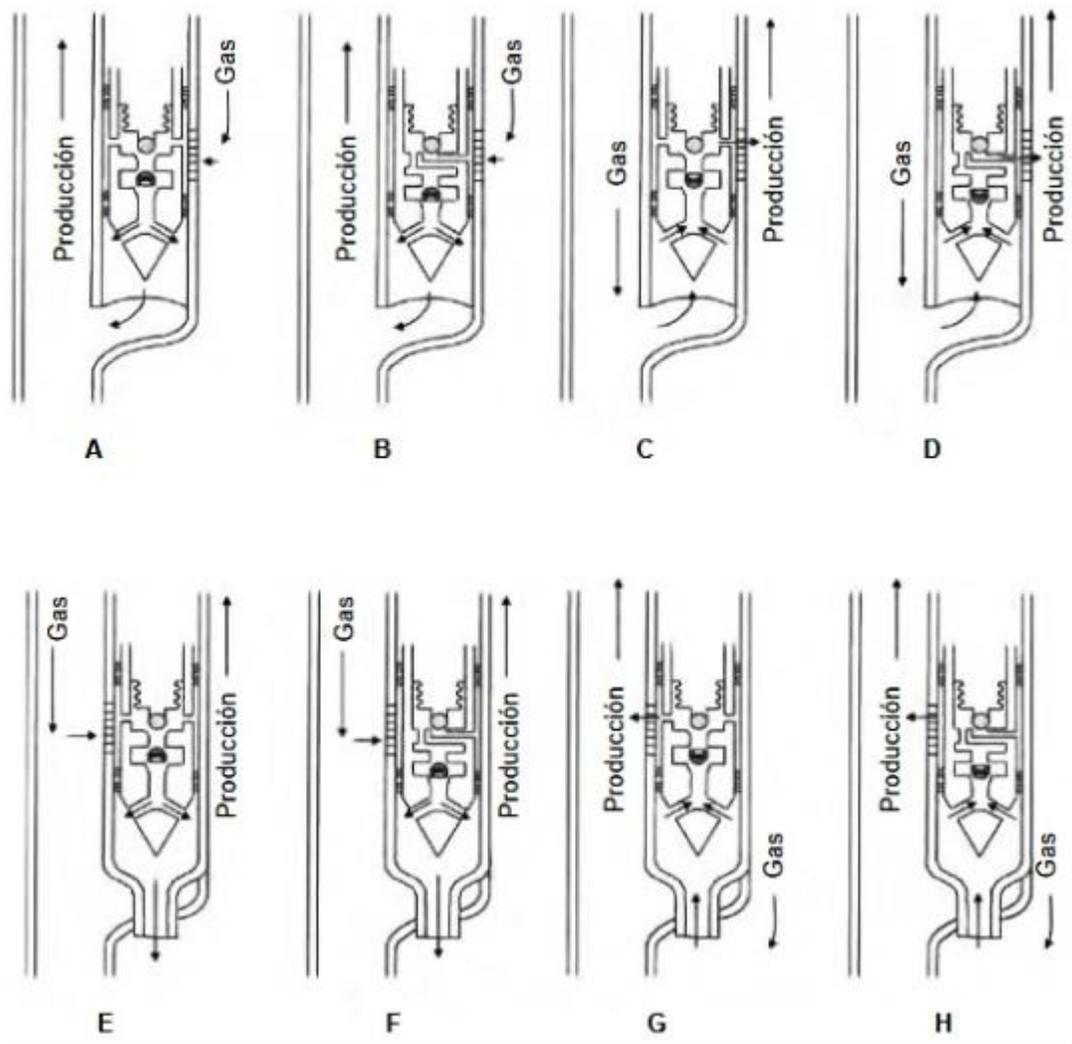


**Figura 2.9** Configuraciones de válvulas de bombeo neumático.

En la **Figura 2.10** se muestran las ocho posibles combinaciones de los cuatro tipos de válvula y los dos mandriles. Por otra parte, en la Tabla 2.1 se presenta una descripción de cada una de ellas.

Ilustración	Configuración de válvula	Mandril	Flujo	Tipo de válvula
A	1	1	TP	IPO
B	1	1	TP	PPO
C	1	1	Anular	PPO
D	1	1	Anular	IPO
E	2	2	Anular	IPO
F	2	2	Anular	PPO
G	2	2	TP	PPO
H	2	2	TP	IPO

**Tabla 2.1** Combinación de válvula y mandril (referencia a la **Figura 2.10**)



**Figura 2.10** Combinaciones de válvulas y mandriles.

## Capítulo 3

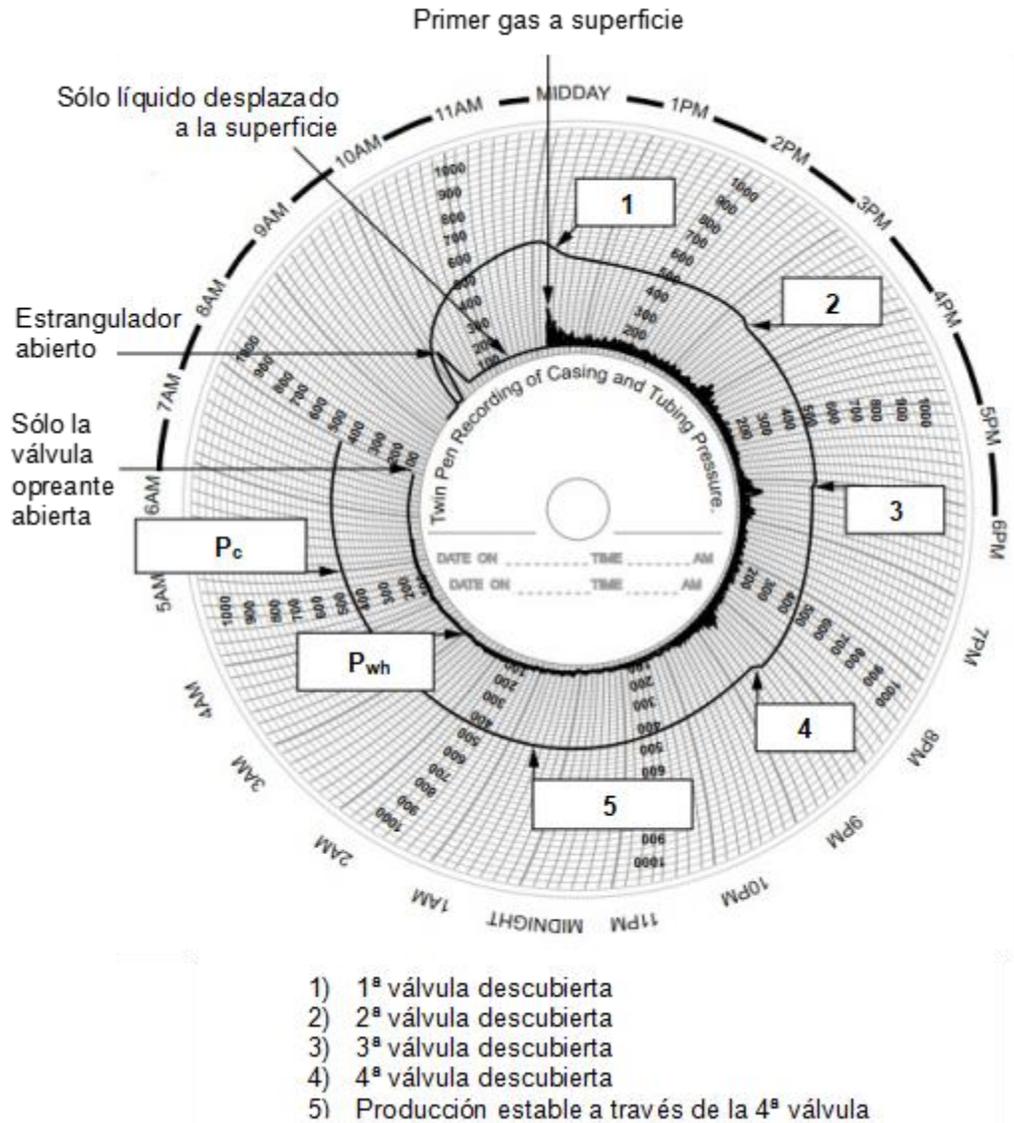
# Diseño del bombeo neumático continuo

En este capítulo se describe un método para diseñar un sistema de bombeo neumático continuo (BNC). Primeramente, se describe el proceso de descarga de un pozo mediante la inyección de gas de BN. Posteriormente, se presenta un método para determinar la profundidad de colocación de las válvulas de descarga. Finalmente se describen los pasos para dimensionar la válvula operante, así como calcular la presión de apertura de las válvulas.

### 3.1 Proceso de descarga de un pozo con BNC

La **Figura 3.1** muestra un registro del comportamiento de las presiones instantáneas en TP y TR durante la descarga de un pozo con BNC. En este ejemplo, el pozo cuenta con cuatro válvulas instaladas, mismas que se encuentran abiertas al comienzo de la operación. En la figura también se marcan diferentes momentos del proceso.

Con referencia a la **Figura 3.1**, cuando el gas se inyecta en el espacio anular, la presión se incrementa y el nivel del líquido acumulado baja debido a que se transfiere del espacio anular a la TP a través de las válvulas. Ahora bien, en el instante en que el gas de inyección alcanza la primera válvula (la más somera) y entra a la TP, se registra un incremento súbito de presión en la cabeza del pozo,  $P_{wh}$ , y un decremento de la presión en el espacio anular,  $P_c$ . Esto mismo ocurre conforme la presión del gas de BN se transfiere a cada válvula inferior.



**Figura 3.1** Medición de las presiones instantáneas en TP y TR durante la descarga de un pozo con BNC.

Inmediatamente después de que el gas de inyección comienza a entrar a la TP a través de la siguiente válvula inferior, la presión en la TR disminuye debido a que la válvula recién descubierta fue ajustada para permanecer abierta a una presión de inyección más baja que la presión de descarga de la válvula inmediata superior. A medida que cada válvula inferior queda descubierta, la válvula inmediata superior cierra por la

reducción de la presión en la TR si es del tipo IPO, o por la reducción de la presión en la TP cuando se trata de válvulas tipo PPO.

Como puede observarse en la **Figura 3.1**, la  $P_{wh}$  presenta oscilaciones durante todo el proceso de descarga hasta que eventualmente alcanza un valor estabilizado; esto ocurre cuando el gas de inyección está entrando por la cuarta válvula (que actuará en adelante como la *válvula operante*) y ya todas las válvulas superiores están cerradas.

## **3.2 Diseño del BNC con base en el método API**

Los cálculos en el diseño de instalaciones de BNC se dividen en dos partes:

1. Determinación de la profundidad de las válvulas.
2. Dimensionamiento de la válvula operante y cálculo de presión de apertura de las válvulas de descarga.

El método de diseño descrito en este trabajo se basa en el del *American Petroleum Institute*, API (RP 11V6, 1999) para válvulas con un mismo tamaño de puerto y un decremento de presión de inyección constante para cada válvula. A continuación se detallan los pasos del método.

### **3.2.1 Determinación de la profundidad de las válvulas**

En el diseño del espaciamiento, para posicionar la válvula más profunda se asume en ésta una diferencia de 100 a 200 lb/pg<sup>2</sup> entre la presión de fondo del gas de inyección,  $P_{ioD}$  y la presión de los fluidos de producción,  $P_{pFD}$ . Los pasos siguientes del método son:

- 1) Calcular la máxima relación gas de inyección-líquido,  $RG_iL$ , con base al máximo gasto del gas de inyección y el gasto máximo de fluidos del yacimiento:

$$RG_iL = \frac{q_{gi}}{q_{lt}} . \quad (3.1)$$

- 2) Con un modelo para flujo multifásico, calcular la presión de los fluidos de producción,  $P_{pfD}$  en el extremo inferior del pozo.

- 3) Calcular el gradiente de los fluidos de producción arriba del punto de inyección:

$$g_{pfa} = \frac{P_{pfD} - P_{wh}}{D_d} . \quad (3.2)$$

- 4) Calcular la presión de fondo del gas de inyección en el extremo inferior del pozo,  $P_{ioD}$  y el gradiente de presión del gas de inyección  $g_{gio}$ :

$$g_{gio} = \frac{P_{ioD} - P_{io}}{D_d} . \quad (3.3)$$

- 5) Calcular el gradiente de temperatura asumiendo un comportamiento lineal entre la temperatura en la cabeza del pozo y la temperatura de fondo:

$$g_{Tv} = \frac{T_{ws} - T_{wh}}{D_d} . \quad (3.4)$$

- 6) Calcular la profundidad de la válvula superior con base a la presión de arranque  $P_{ko}$  o la presión promedio del gas de inyección:

$$D_{v1} = \frac{P_{ko} - P_{wh} - \Delta P_{sD}}{g_{ts} - g_{gio}} . \quad (3.5)$$

7) Determinar la presión mínima de los fluidos de producción,  $P_{pfD|min}$ , la presión del gas de inyección,  $P_{ioD}$ , y la temperatura de descarga,  $T_{vuD}$ , todas a la profundidad de la válvula,  $D_v$ :

$$P_{pfD(n)|min} = P_{wh} + g_{pfa} D_{v(n)} , \quad (3.6)$$

$$P_{ioD(n)} = P_{io} + g_{gio} D_{v(n)} , \quad (3.7)$$

$$T_{vuD(n)} = T_{wh} + g_{Tv} D_{v(n)} . \quad (3.8)$$

donde  $n$  es el número de válvula ( $n = 1$ , corresponde a la válvula más somera).

8) Calcular la profundidad de la segunda válvula con base al decremento mínimo de presión,  $\Delta P_{io}$ , asignado al espaciamiento de las válvulas y el gradiente de presión del gas de inyección:

$$D_{bv} = \frac{P_{ioD(n-1)} - (n-1) \Delta P_{io} - P_{pfD(n-1)|min} - \Delta P_{sD}}{g_{ls} - g_{gio}} , \quad (3.9)$$

$$D_{v(n)} = D_{v(n-1)} + D_{bv} . \quad (3.10)$$

Cuando la distancia calculada entre válvulas,  $D_{bv}$ , es menor que la distancia mínima asignada,  $D_{bv|min}$ , se debe usar esta última.

9) Repetir los pasos 7 y 8 hasta alcanzar la máxima profundidad deseada  $D_{v|max}$ .

### 3.2.2 Dimensionamiento de la válvula operante y cálculo de la presión de apertura de las válvulas de descarga

La selección del tamaño de puerto se basa en la máxima profundidad de bombeo y la presión operativa final del gas de inyección para espaciar la válvula más profunda. Los pasos para el dimensionamiento de la válvula son los siguientes:

1) Registrar las especificaciones de la válvula,  $A_p$ ,  $R$ ,  $1-R$ ,  $F_{pp}$ , en función del diámetro externo de la válvula y los diámetros internos disponibles presentados en la **Tabla 3.1**. Cabe mencionar que debe tomarse el valor de diámetro siguiente más alto a fin de asegurar el paso de gas.

2) Calcular la presión inicial de apertura a la profundidad de la válvula superior ( $n=1$ ):

$$P_{oD(n)} = P_{ioD(n)}. \quad (3.11)$$

3) Calcular la  $P_{tro}$  de la primera válvula:

$$P_{tro} = C_{T(n)} (F_{pp} P_{pfD(n)} + P_{oD(n)}). \quad (3.12)$$

4) Calcular la presión inicial de apertura de la segunda válvula:

$$P_{oD(n)} = P_{ioD(n)} - (n - 1) \Delta P_{io}. \quad (3.13)$$

5) Calcular la máxima presión de producción opuesta a la válvula superior inmediatamente después que el punto de inyección se ha transferido a la válvula inferior:

$$P_{pfD(1)|max} = P_{wh} + D_{v1} \left( \frac{P_{oD2} - P_{wh}}{D_{v2}} \right). \quad (3.14)$$

- 6) Determinar si la disminución de la presión de inyección asumida,  $\Delta P_{io}$ , es suficiente para el diámetro de válvula requerido calculando un efecto de presión-producción adicional,  $\Delta P_{pe1}$ , en la válvula superior:

$$\Delta P_{pe1} = F_{pp} (P_{pfD(1)|max} - P_{pfD(1)|min}). \quad (3.15)$$

Si  $\Delta P_{pe1}$  es menor o igual que la  $\Delta P_{io}$  asumida se procede con el diseño, de lo contrario hacer  $\Delta P_{io} = \Delta P_{pe1}$  y recalculer el diseño de espaciamiento.

- 7) Repetir los pasos 3 y 4 para la segunda válvula, y luego los pasos 3, 4 y 5 para las válvulas restantes. Si la válvula operante es una válvula check de orificio, determinar el diámetro del orificio en base a las  $P_u$  y  $P_d$  calculadas.

Si se usa una válvula de orificio para válvula de fondo, cabe destacar que la presión de inyección corriente arriba  $P_u$  deberá ser menor o igual que la presión inicial de apertura de la última válvula de descarga. La diferencia de presión en la válvula de orificio es  $\Delta P_{vo} = P_u - P_d$ . En este contexto, se debe analizar el comportamiento de la válvula de orificio particularmente en la región de flujo subcrítico para evitar problemas de inestabilidad y, en su caso, instalar una válvula venturi; en el apéndice C se muestra una comparativa entre estos dos tipos de válvulas.

Tamaño del puerto (ID), pg	* Carrera del vástago completamente abierto, pg
Válvulas de BN de 1 pg de OD con $Ab = 0.31 \text{ pg}^2$	
1/8	0.0440
3/16	0.0714
1/4	0.1002
5/16	0.1302
3/8	0.1610
Válvulas de BN de 1½ pg de OD con $Ab = 0.77 \text{ pg}^2$	
3/16	0.0714
1/4	0.1002
5/16	0.1302
3/8	0.1610
7/16	0.1925
1/2	0.2246
* La carrera del vástago con la válvula completamente abierta se basa en el diámetro externo de la bola que es 1/16 pg más grande que el diámetro interno.	

**Tabla 3.1** Especificaciones de válvulas con bola y asiento de canto afilado (Modificada de Winkler y Blann, 2007)

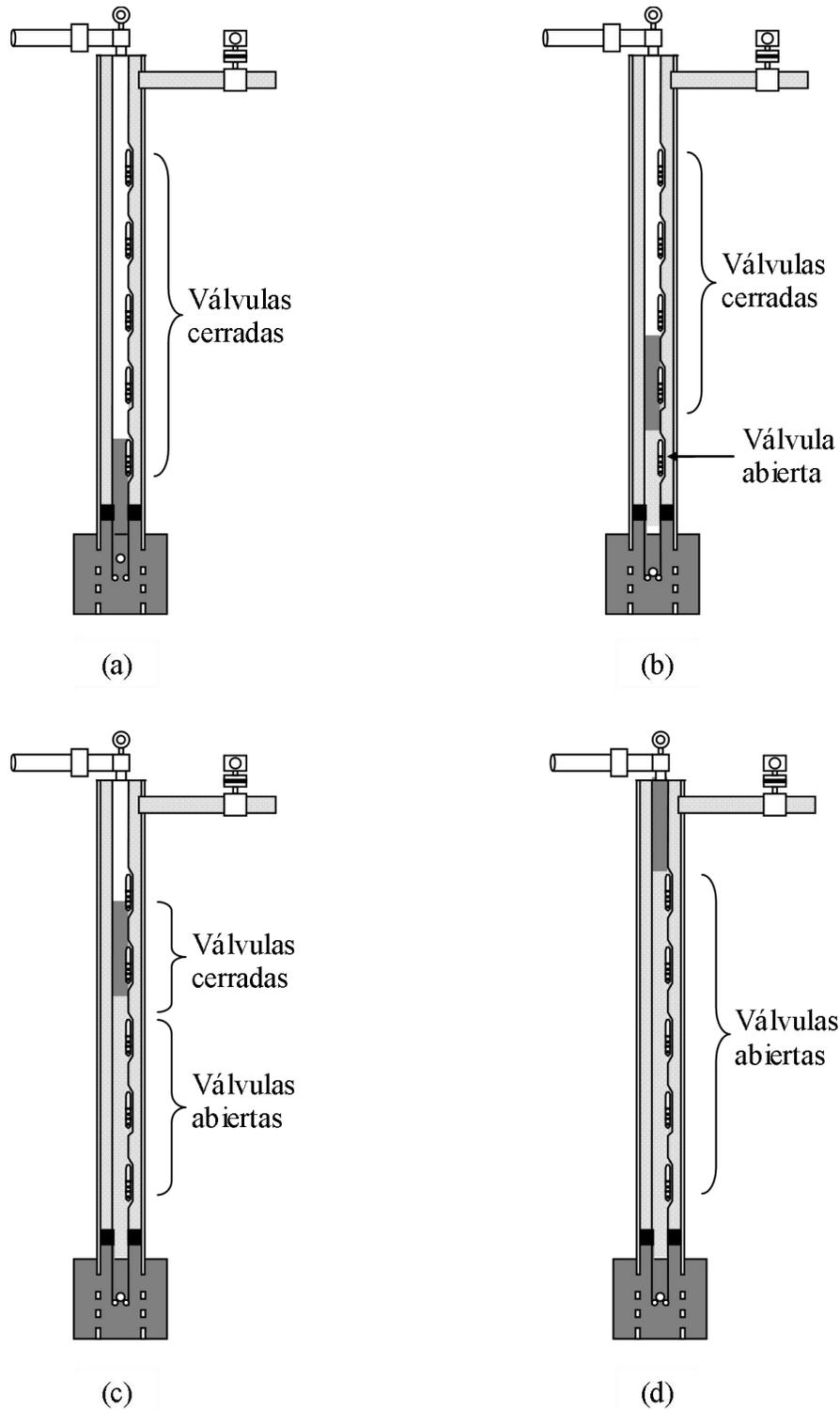
## Capítulo 4

# Diseño del bombeo neumático intermitente

En este capítulo, se aborda el diseño de los sistemas de bombeo neumático intermitente (BNI). Para comenzar, se describen las etapas que se presentan durante un ciclo de operación convencional. Después se documentan dos métodos utilizados en la práctica para diseñar este tipo de sistema artificial de producción. Asimismo, se explican las cámaras de BNI como un tipo especial de instalación y se indican algunos cálculos relacionados con su dimensionamiento. También se menciona brevemente el uso de émbolos como un elemento auxiliar para reducir el escurrimiento de líquido e incrementar el volumen de líquido recuperado en la superficie.

### 4.1 Secuencia de operación del BNI

El bombeo neumático intermitente, consiste en inyectar gas a alta presión de forma cíclica o intermitente debajo de una columna de líquido, creando una burbuja que empuja el bache de líquido hacia la superficie. En la **Figura 4.1** se ilustran las diferentes etapas de un ciclo de operación de un pozo con BNI. A continuación, se describe cada una de ellas.



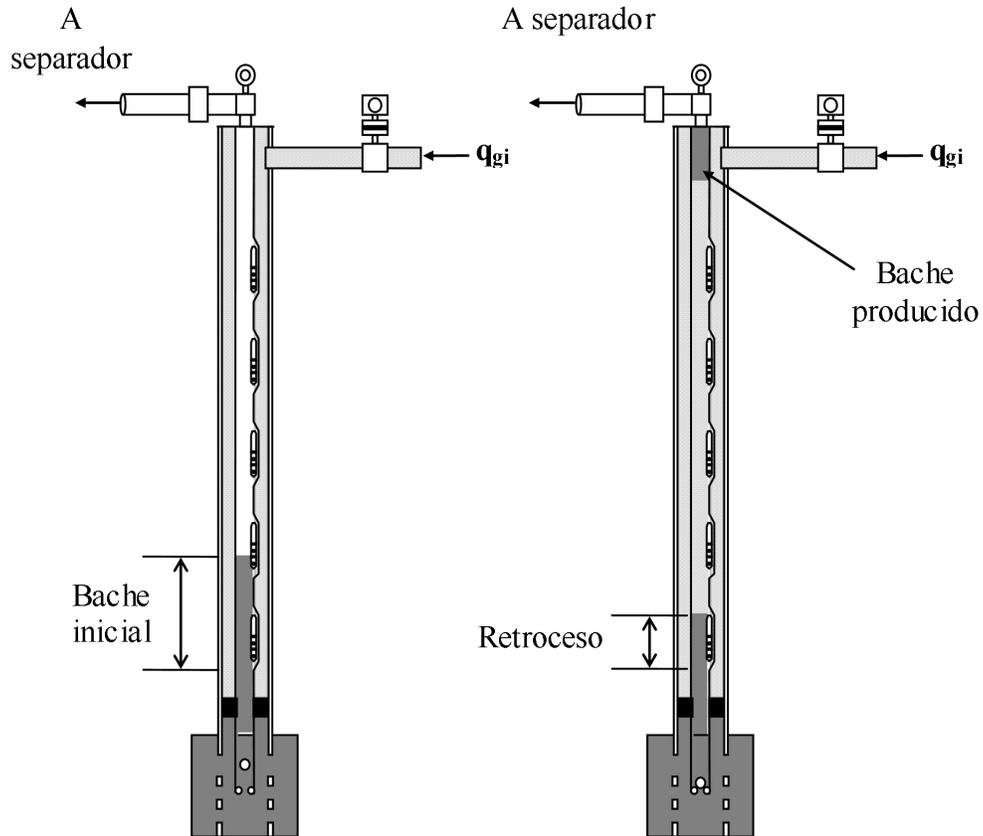
**Figura 4.1** Ciclo de BNI con múltiples puntos de inyección de gas (Modificado de Takács, 2005).

En la **Figura 4.1a** se muestran las condiciones del pozo justo antes que tenga lugar la inyección del gas. Todas las válvulas de inyección están cerradas y los fluidos de la formación pasan a través de la válvula de pie formando una columna de líquido dentro de la TP.

En la **Figura 4.1b**, cuando la columna de líquido en la TP alcanza una altura determinada, la presión generada cierra la válvula de pie; en tanto que la válvula de inyección del fondo se abre debido a la presión de los fluidos cuando es del tipo PPO o en respuesta a la presión del gas de inyección cuando se trata de una válvula piloto.

Conforme el bache pasa por las válvulas siguientes, éstas se abren para pasar gas del espacio anular hacia la TP como se muestra en la **Figura 4.1c**; de esta forma todas las válvulas están abiertas cuando el bache llega a la cabeza del pozo (**Figura 4.1d**). En ese punto, se purga el gas residual en la TP, comienza de nuevo la acumulación de fluidos en la TP hasta alcanzar el nivel mostrado en la **Figura 4.1a** y el ciclo se repite.

Con respecto al volumen de líquido producido efectivamente en cada ciclo, cabe destacar que, cuando el bache está siendo desplazado dentro de la TP, parte del líquido moja las paredes de la tubería y escurre de vuelta al fondo del pozo; a este volumen de líquido suele referírsele como el “retroceso”, y corresponde a la diferencia volumétrica del bache inicial y el bache producido, como se ilustra en la **Figura 4.2**. También es importante mencionar el gas de BN entrará lentamente y tenderá a burbujear a través del líquido si el puerto de la válvula operante es pequeño o abre de forma estrangulada.



**Figura 4.2** Retroceso de líquido en una instalación con BNI (Modificada de Blann et al., 1994).

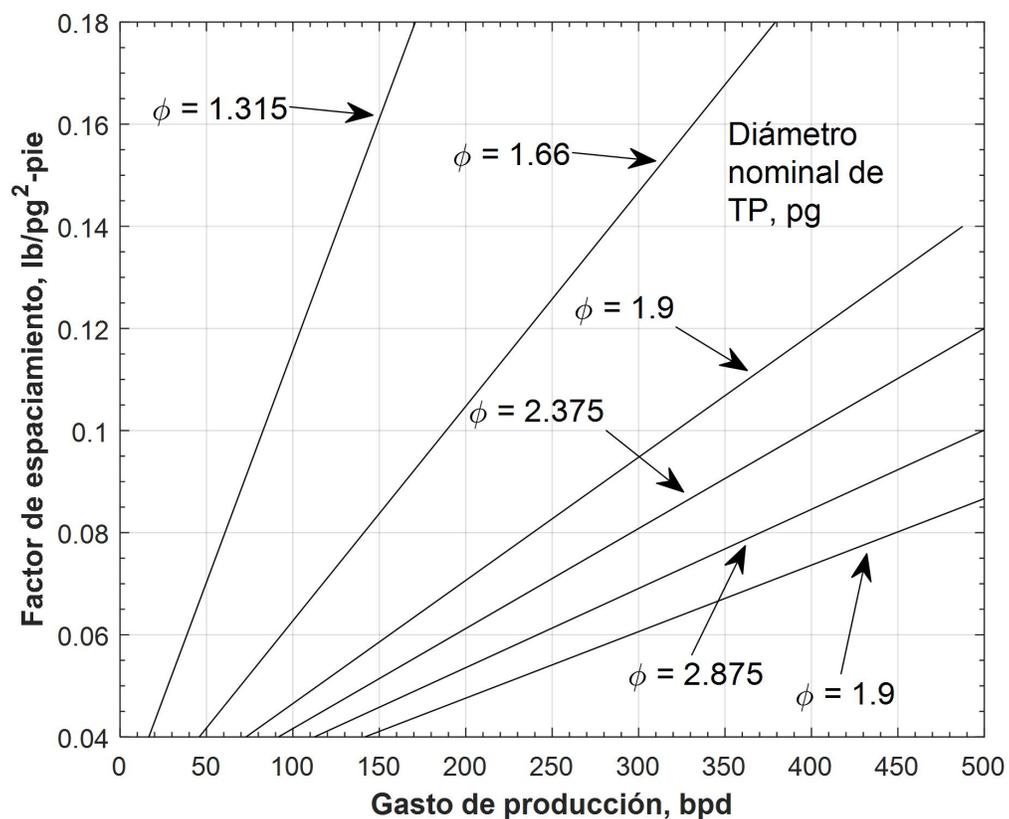
## 4.2 Métodos de diseño de instalaciones con BNI

Los métodos de diseño de los sistemas de BNI corresponden generalmente a dos categorías: por gradiente de retroceso y por porcentaje de carga. A continuación, se describen ambos.

### 4.2.1 Método por gradiente de retroceso

En este método (Winkler y Blann, 2007) se usa el gradiente del gas, retroceso del líquido y la entrada de líquido para predecir la mínima presión que se puede conseguir en la TP. Entre las consideraciones del método pueden mencionarse las siguientes:

- 1) Tomando en cuenta las fluctuaciones en la presión del gas de inyección inherentes a las operaciones del BNI, la presión de cierre de las válvulas en superficie debe ser 100 lb/pg<sup>2</sup> menor que la presión de inyección disponible.
- 2) Debido a que los gastos de producción tienden a ser irregulares y son normalmente bajos en el BNI, en los cálculos de diseño se asume un gradiente lineal de temperatura.
- 3) El factor de espaciamento (gradiente de descarga) puede determinarse a partir de cartas publicadas en la literatura especializada en función del gasto de producción y el diámetro de la TP, como la mostrada en la **Figura 4.3**.



**Figura 4.3** Factor de espaciamento (Modificado de Blann et al., 1994).

A continuación se describen los pasos del método.

- 1) Determinar el factor de espaciamiento,  $S_f$ , el cual es el gradiente de descarga en la TP.
- 2) Calcular la presión del gas de inyección,  $P_{io}$ , restando 50 lb/pg<sup>2</sup> de la presión del gas de inyección máxima disponible; calcular la presión de fondo del gas de inyección,  $P_{ioD}$ , el gradiente del gas de inyección,  $g_{gio}$ , donde:

$$g_{gio} = \frac{P_{ioD} - P_{io}}{D_d} \quad (4.1)$$

- 3) Asumiendo un comportamiento lineal, determinar el gradiente de temperatura,  $g_{Tv}$ :

$$g_{Tv} = \frac{T_{ws} - T_{wh}}{D_d} \quad (4.2)$$

- 4) Calcular la presión superficial de cierre,  $P_{vcs}$ , restando 100 lb/pg<sup>2</sup> a la presión del gas de inyección en superficie,  $P_{io}$ , y determinar la presión de cierre a la profundidad del pozo,  $P_{vcD}$ , y el gradiente de presión de cierre de las válvulas,  $g_{Pvc}$ , donde:

$$g_{Pvc} = \frac{P_{vcD} - P_{vcs}}{D_d} \quad (4.3)$$

- 5) Calcular la profundidad de la primera válvula,  $D_{v1}$ , y luego la presión de los fluidos de en la TP,  $P_{pfD1}$ , la presión del gas de inyección,  $P_{ioD1}$ , la presión de cierre de la válvula,  $P_{vc}$ , y la temperatura,  $T_{vuD1}$ , todas medidas a dicha profundidad:

$$D_{v1} = \frac{P_{io} - P_{wh}}{g_{ls} - g_{gio}}, \quad (4.4)$$

$$P_{pfD1} = P_{wh} + S_f D_{v1}, \quad (4.5)$$

$$P_{vcD1} = P_{vcs} + g_{Pvc} D_{v1}, \quad (4.6)$$

$$T_{vuD1} = T_{wh} + g_{Tv} D_{v1}. \quad (4.7)$$

6) Para el resto de las válvulas, repetir el siguiente paso hasta completar la profundidad total:

$$D_{v(n)} = \frac{P_{vcs} - P_{pfD(n-1)} + g_{ls} D_{v(n-1)}}{g_{ls} - g_{Pvc}}, \quad (4.8)$$

$$P_{pfD(n)} = P_{wh} + S_f D_{v(n)}, \quad (4.9)$$

$$P_{vcD(n)} = P_{vcs} + g_{Pvc} D_{v(n)}, \quad (4.10)$$

$$T_{vuD(n)} = T_{wh} + g_{Tv} D_{v(n)}. \quad (4.11)$$

7) Con las presiones de cierre de las válvulas y las temperaturas registradas a sus respectivas profundidades, se calculan las presiones de apertura en banco de calibración,  $P_{vo}$ , junto con los factores de corrección por temperatura  $C_t$ .

#### 4.2.2 Método de porcentaje de carga

De acuerdo con este método (White et al. 1963), la presión de la producción en la TP debe ser aproximadamente el 60% de la presión del gas de inyección a la profundidad de la válvula. De esta forma, conociendo la presión del gas a la profundidad de la válvula, se puede calcular la presión de los fluidos en la TP cuando la válvula abre. Una vez conocidas ambas presiones, se puede calcular la presión de cierre de la válvula.

El procedimiento del método de porcentaje de carga es el siguiente:

1) Calcular los gradientes de presión del gas de inyección y de temperatura:

$$g_{gio} = \frac{P_{ioD} - P_{io}}{D_d}. \quad (4.12)$$

$$g_{Tv} = \frac{T_{ws} - T_{wh}}{D_d}. \quad (4.13)$$

- 2) Determinar la presión de los fluidos de producción en superficie,  $P_{pfs}$ , y en el fondo,  $P_{pfd}$ , al 60% de las presiones correspondientes del gas de inyección. Con esos valores, calcular el gradiente de porcentaje de carga,  $g_{PL}$ :

$$P_{pfs} = 0.6 P_{io},$$

$$P_{pfd} = 0.6 P_{ioD}, \quad (4.14)$$

$$g_{PL} = \frac{P_{pfd} - P_{pfs}}{D_d}. \quad (4.15)$$

- 3) Calcular la profundidad de la primera válvula,  $D_{v1}$ , la presión de los fluidos de producción,  $P_{pfd1}$ , la presión del gas de inyección,  $P_{ioD1}$ , y la temperatura  $T_{vuD1}$ , todos a la profundidad de la primera válvula:

$$D_{v1} = \frac{P_{io} - P_{wh}}{g_{ls} - g_{gio}}, \quad (4.16)$$

$$P_{ioD1} = P_{io} + g_{gio} D_{v1}, \quad (4.17)$$

$$P_{pfd1} = P_{pfs} + g_{PL} D_{v1}, \quad (4.18)$$

$$T_{vuD1} = T_{wh} + g_{Tv} D_{v1}. \quad (4.19)$$

- 4) Para el resto de las válvulas, se realizan los siguientes cálculos:

$$D_{v(n)} = \frac{P_{io} - P_{pfd(n-1)} + g_{ls} D_{v(n-1)}}{g_{ls} - g_{gio}}, \quad (4.20)$$

$$P_{ioD(n)} = P_{io} + g_{gio} D_{v(n)}, \quad (4.21)$$

$$P_{pfd(n)} = g_{PL} D_{v(n)}, \quad (4.22)$$

$$T_{vuD(n)} = T_{wh} + g_{Tv} D_{v(n)}. \quad (4.23)$$

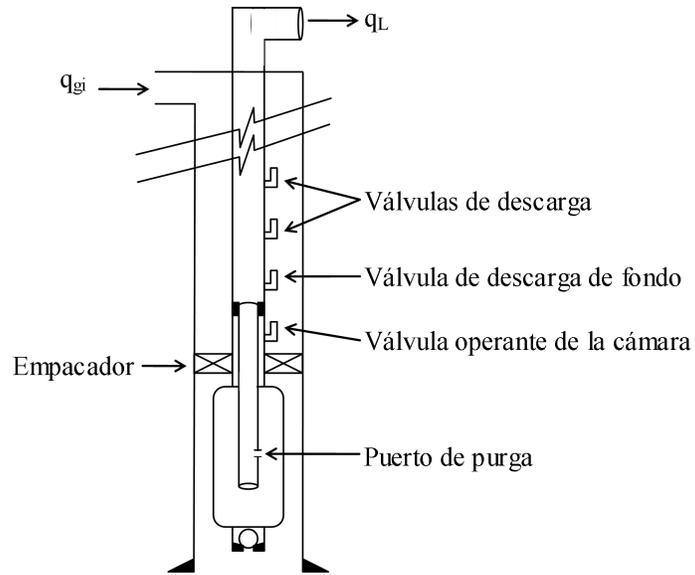
- 5) Por último, se calcula la presión de los fuelles @ $D_d$ , la presión de apertura  $P_{vo}$  @60°F y el factor de corrección de temperatura correspondiente  $C_T$  para cada válvula, a partir de las ecuaciones de la mecánica de las válvulas respectivas.

### 4.3 Cámaras de bombeo neumático

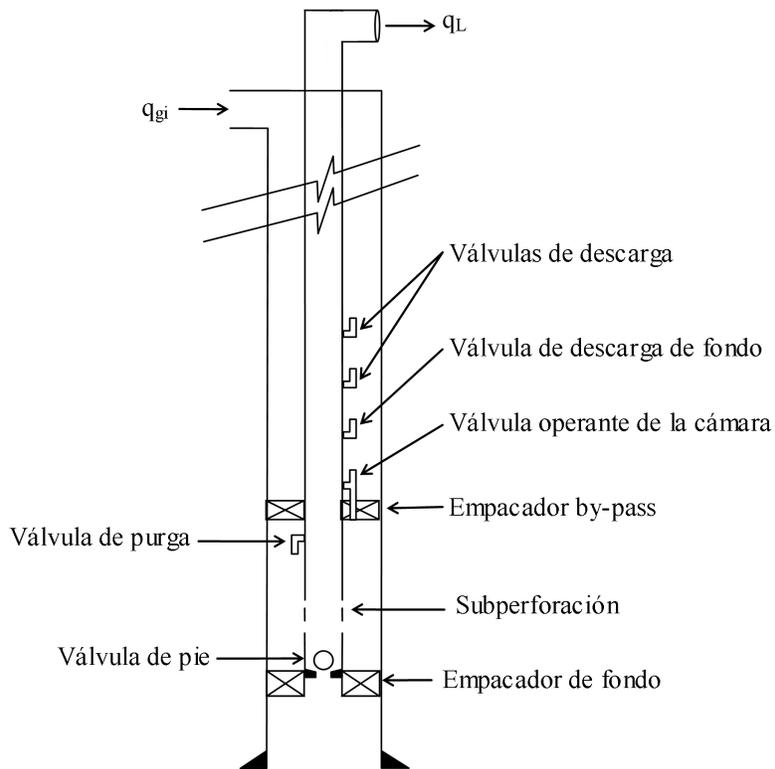
Las cámaras son un tipo especial de instalación de BNI en donde el pozo tiene buen índice de productividad, pero su presión de fondo no es suficiente para soportar la acumulación de grandes columnas de líquido o baches. El uso de cámaras de bombeo incrementa la presión del gas de inyección alcanzando una presión de fondo fluyendo más baja al reducir la contrapresión en la cara de la formación para un volumen dado de líquido.

Los dos tipos fundamentales de cámaras de bombeo son la inserta y la de doble empacador. La **Figura 4.4** muestra una instalación de cámara del primer tipo, la cual puede ser usada lo mismo en agujero descubierto que en agujero ademado. Por otra parte, una instalación con cámara de doble empacador se presenta en la **Figura 4.5**.

En una instalación como la mostrada en **Figura 4.5**, el líquido entra a la TP por la válvula de pie y, a través de las subperforaciones que están justo arriba del empacador inferior, llena el espacio anular entre ésta y la cámara. Por otra parte, la válvula de purga ventila el gas atrapado en el espacio anular por encima del líquido hacia la TP. A un tiempo predeterminado, se inyecta gas en el espacio anular TP/TR, la válvula operante de la cámara abre y el gas de inyección pasa a través del empacador superior al espacio anular entre la cámara y esa sección de la TP.



**Figura 4.4** Instalación con cámara inserta.



**Figura 4.5** Instalación con cámara de doble empacador.

La válvula de purga cierra debido al incremento de la presión del gas arriba del líquido y, conforme ésta continúa aumentando, el líquido en el espacio anular de la cámara es empujado hacia la TP a través de las subperforaciones. La válvula de pie impide el regreso del líquido. El gas que sigue al líquido entra a la TP y fuerza al líquido hacia la superficie. En este momento, la válvula de la cámara cierra, el gas restante se purga, la válvula de purga abre y de nuevo entra líquido a través de la válvula de pie y el ciclo se repite.

Ahora bien, dos puntos que deben considerarse en la instalación son la longitud de la cámara y presión de su válvula. Por un lado, la longitud de la cámara puede determinarse a partir de igualar la presión en la cabeza del pozo,  $P_{wh}$ , más la carga hidrostática del líquido en la TP arriba de la cámara,  $H_{hy}$ , justo cuando la cámara vacía el 60% de la presión del gas de inyección máxima disponible,  $P_{io}$ , en la válvula de la cámara. Esto es:

$$P_{wh} + H_{hy} = 0.6 P_{io} , \quad (4.24)$$

$$H_{hy} = 0.6 P_{io} - P_{wh} . \quad (4.25)$$

La altura,  $H$ , de la columna de líquido en la TP es la presión hidrostática  $H_{hy}$ , dividida entre el gradiente estático de los fluidos,  $g_{ls}$

$$H = \frac{H_{hy}}{g_{ls}} . \quad (4.26)$$

La longitud de la cámara,  $C_L$ , se determina a partir de las siguientes ecuaciones:

$$C_L = \frac{H}{R_{ct}+1} , \quad (4.27)$$

$$R_{ct} = \frac{V_{ca}}{V_t} . \quad (4.28)$$

Cabe destacar que la válvula de la cámara usualmente es de tipo piloto, y la única presión que asiste a la presión del gas de inyección en la apertura es la presión en la cabeza del pozo. No hay líquido arriba de válvula de la cámara.

De acuerdo con las ecuaciones de la mecánica de las válvulas, la presión de los fuelles a la profundidad de la válvula,  $P_{bvD}$ , y la presión de apertura en banco de calibración pueden calcularse como:

$$P_{bvD} = P_{io} (1 - R) + P_{pfD} R , \quad (4.29)$$

$$P_{tro} = \frac{P_{bvD} C_T}{1-R} \quad (4.30)$$

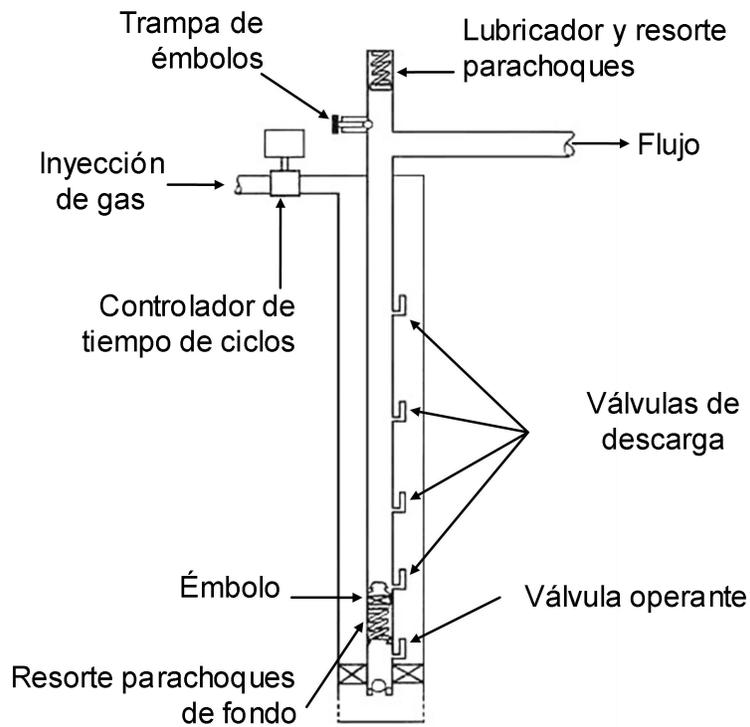
de tal forma que  $P_{pfD} \approx P_{wh}$ .

#### 4.4 Uso de émbolos en el BNI

Como se mencionó en secciones previas, uno de los aspectos importantes a considerar en los sistemas de BNI es el retroceso del líquido y la consecuente pérdida de producción por ciclo debido al rompimiento del gas de inyección en el bache mientras éste se desplaza a la superficie. De esta manera, una solución para reducir el retroceso es mediante el uso de un émbolo, el cual actúa como una frontera o pistón entre el gas de inyección y el líquido, minimizando el rompimiento del gas y también limpia las paredes de la TP, reduciendo la cantidad de líquido que escurre.

En la **Figura 4.6** se muestra una instalación de BNI de émbolo. Para usarlo, se instala una tubería de detención y un resorte parachoques justo arriba de la válvula operante en el fondo. Después de que el bache sale en superficie, el émbolo cae hasta el resorte parachoques e inicia otro ciclo.

Sin embargo, debe considerarse en el diseño que ninguna de las válvulas superiores abra mientras se opera desde la válvula de fondo; de lo contrario, el émbolo quedaría inútil si una de las válvulas superiores cambia a operante.



**Figura 4.6** Instalación de BNI con émbolo.

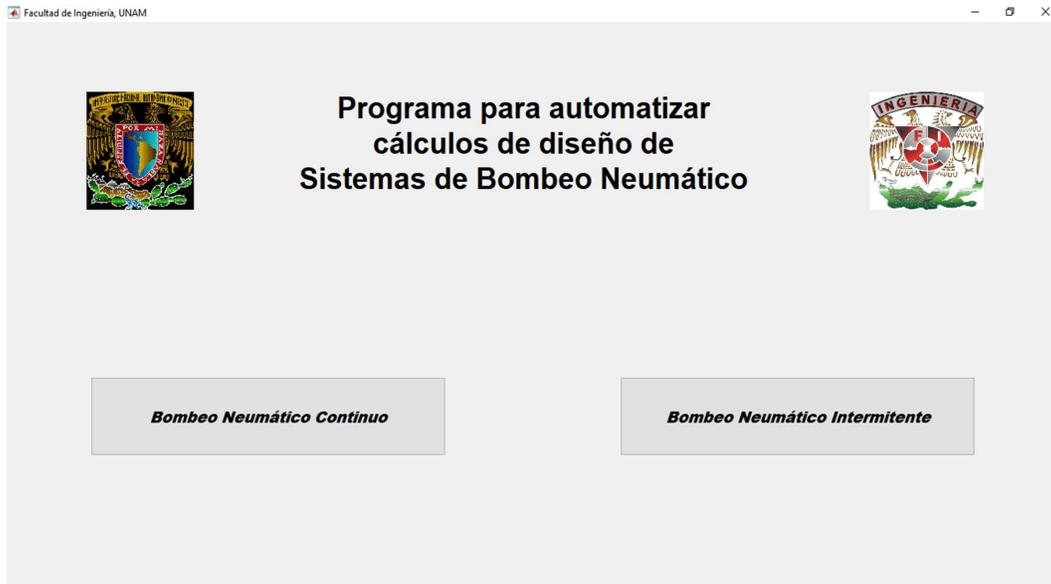
## Capítulo 5

# Programa de cómputo para automatizar cálculos de diseño de sistemas de BN

En este capítulo, se describe el programa de cómputo desarrollado en este trabajo para automatizar los cálculos del diseño de los sistemas bombeo neumático, tanto continuo como intermitente. Se describen las características del programa, su interfaz gráfica de usuario y sus funcionalidades. Los resultados de la herramienta se verifican con datos de dos pozos con bombeo neumático reportados en la literatura.

### 5.1 Descripción del programa

El programa computacional desarrollado cuenta con funcionalidades para realizar cálculos requeridos en el diseño de los sistemas de bombeo neumático continuo e intermitente en pozos petroleros productores de aceite y gas asociado. Para tal efecto, se implementaron los métodos de diseño abordados en el capítulo 3 y el capítulo 4. Como entorno de programación se utilizó Matlab®, y la herramienta cuenta con una interfaz gráfica de usuario para facilitar tanto el ingreso de datos como la visualización de resultados. En el apéndice D, se dan las instrucciones para la instalación del programa. En la **Figura 5.1** se muestra la interfaz principal del programa.



**Figura 5.1** Interfaz gráfica de usuario del programa de cómputo desarrollado para automatizar los cálculos del diseño de bombeo neumático.

El programa de cómputo predice la profundidad de colocación de las válvulas; asimismo, para cada una de ellas, el diámetro del puerto de inyección, la presión en TR, la presión mínima en la TP, la presión inicial de apertura, la presión de los fuelles y la temperatura de descarga; también se determina su respectivo factor de corrección por temperatura y la presión respectiva de apertura en banco de calibración.

Es importante destacar que la herramienta cuenta con funciones internas que permiten calcular las propiedades del aceite, gas asociado y agua a condiciones de flujo mediante diversas correlaciones empíricas PVT utilizadas ampliamente en la industria. Por otra parte, los gradientes de presión en la sarta de producción se determinan a partir de un método clásico de predicción del flujo multifásico en tuberías. Las correlaciones implementadas se indican en las **Tablas 5.1** y **5.2**.

En las secciones siguientes se describe cómo configurar los cálculos correspondientes al diseño de los sistemas de bombeo neumático continuo e intermitente.

Variable	Referencia
Compresibilidad del aceite	Vázquez y Beggs (1980)
Densidad del aceite saturado	Standing (1981)
Densidad relativa del gas disuelto,	Katz (1942)
Factor de compresibilidad del gas	Dranchuk et al. (1973)
Factor de fricción	Colebrook (1939)
Factor de volumen del aceite saturado	Glaso (1980)
Factor de volumen del agua saturada	Dodson y Standing (1944)
Presión de burbuja	Standing (1947), Lasater (1958) y Glaso (1980)
Propiedades pseudocríticas del gas	Standing (1977)
Relación. de calores específicos del gas	Katz (1959)
Relación de solubilidad del aceite	Standing (1947), Lasater (1958) y Glaso (1980)
Tensión interfacial agua-gas	Hocott (1939), Hough et al. (1951)
Tensión interfacial gas-aceite	Baker (1953)
Viscosidad del aceite saturado	Beggs y Robinson (1975)
Viscosidad del agua	McCain et al (1988)
Viscosidad del gas	Lee et al. (1966)

**Tabla 5.1** Correlaciones PVT implementadas en el programa computacional.

Variable	Referencia
Colgamiento del líquido	Mukherjee y Brill (1983)
Diámetro del puerto de las válvulas de inyección	Beggs (1984)
Factor de espaciamiento en BNI	Winkler y Blann (2007)
Gradiente de presión en flujo multifásico	Orkiszewski (1967)
Presión de apertura de la válvula en banco de calibración y su factor de corrección	Winkler y Eads (1989)
Presión de fondo del gas de inyección	Zimmerman (1982)

**Tabla 5.2** Métodos para calcular gradientes de presión y otros parámetros de diseño.

### 5.1.1 Configuración para el sistema de BNC

Al oprimir el botón con la leyenda “*Bombeo Neumático Continuo*” en la pantalla principal (**Figura 5.1**), se despliega la interfaz mostrada en la **Figura 5.2** para ingresar los datos de entrada para realizar los cálculos del diseño del sistema. La información requerida está organizada en tres rubros, según corresponda: a) datos concernientes a las válvulas y la sarta de producción; b) datos de producción/inyección; y c) datos referentes a las condiciones de presión y temperatura. Todas las variables se presentan con sus respectivas unidades de campo. Cabe mencionar que el usuario puede ver una descripción detallada de las variables al pasar el puntero del ratón por los cuadros de texto.

The screenshot shows a software window titled "Bombeo Neumático Continuo". It contains three main input panels:

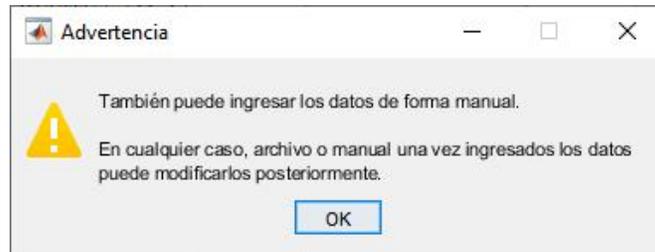
- Válvulas y TP:**
  - Área de fuelles [ $\text{pg}^2$ ]
  - Distancia mínima [ $\text{pie}$ ]
  - Diámetro externo [ $\text{pg}$ ]
  - Profundidad máxima [ $\text{pie}$ ]
  - Decremento de presión [ $\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2}$ ]
  - Longitud total de la TP [ $\text{pie}$ ]
  - Diferencial de presión [ $\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2}$ ]
  - Diámetro de la TP [ $\text{pg}$ ]
- Producción/Inyección:**
  - Densidad del aceite [ $^{\circ}\text{API}$ ]
  - Inyección diaria [ $\frac{\text{Mpie}^3}{\text{d}}$ ]
  - Densidad del agua [ $\text{adim}$ ]
  - Inyección máxima [ $\frac{\text{Mpie}^3}{\text{d}}$ ]
  - Densidad del gas [ $\text{adim}$ ]
  - Gradiente de carga [ $\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2\text{pie}}$ ]
  - Entrada de agua [ $\text{adim}$ ]
  - RGA de la formación [ $\frac{\text{pie}^3}{\text{bbl}}$ ]
  - Producción diaria [ $\frac{\text{Mbl}}{\text{d}}$ ]
- Presión y Temperatura:**
  - Presión de arranque [ $\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2}$ ]
  - Temperatura de fondo [ $^{\circ}\text{F}$ ]
  - Presión en la cabeza [ $\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2}$ ]
  - Temperatura del gas [ $^{\circ}\text{F}$ ]
  - Presión de fondo [ $\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2}$ ]
  - Temperatura de calibración [ $^{\circ}\text{F}$ ]
  - Presión del gas [ $\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2}$ ]
  - Temperatura en la cabeza [ $^{\circ}\text{F}$ ]

At the bottom, there are three buttons: "Aviso", "Archivo de Datos", and "Continuar".

**Figura 5.2** Interfaz gráfica para ingresar los datos de entrada para los cálculos de diseño de un sistema de BNC.

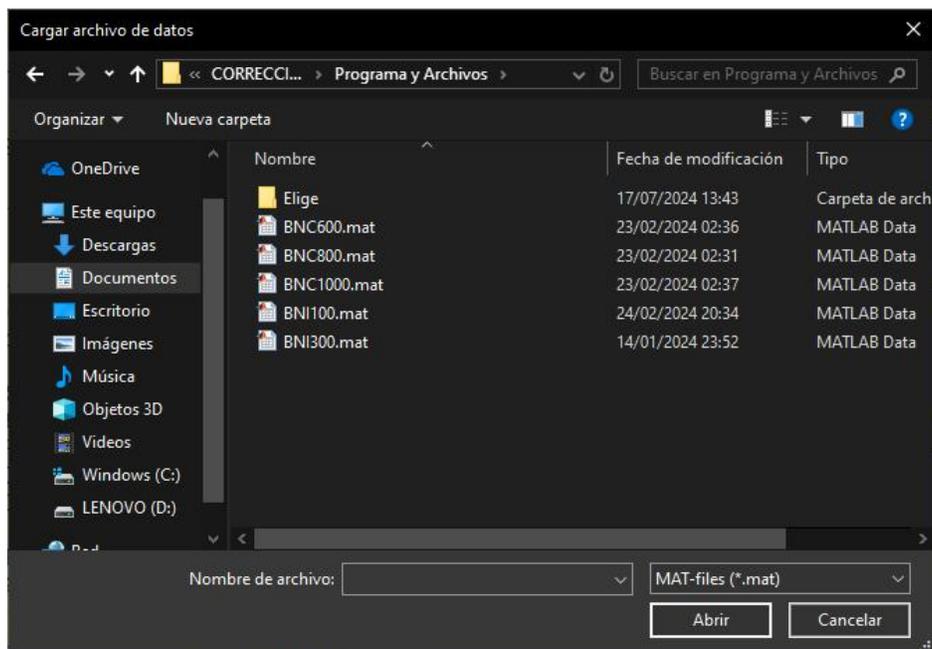
Nótese en la **Figura 5.2** que el botón de “*Continuar*”, localizado en la parte inferior derecha de la interfaz, inicialmente está inactivo; esto es con la finalidad de que el usuario no lo oprima inadvertidamente antes de ingresar todos los datos requeridos o bien si desea corregir alguno.

Es importante mencionar que el programa permite ingresar los datos de entrada directamente sobre la interfaz o a través de un archivo previamente configurado. Al respecto, al oprimir el botón con la leyenda “Aviso”, se despliega la ventana emergente mostrada en la **Figura 5.3**, en la que se le indica al usuario que se cuenta con estas dos posibilidades.



**Figura 5.3** Aviso al usuario sobre forma de ingreso de datos.

En cuanto al botón “*Archivo de Datos*”, al oprimirlo se abre el explorador mostrado en la **Figura 5.4**, donde el usuario puede buscar el archivo correspondiente con los datos de entrada desde cualquier ubicación y medio de almacenamiento.



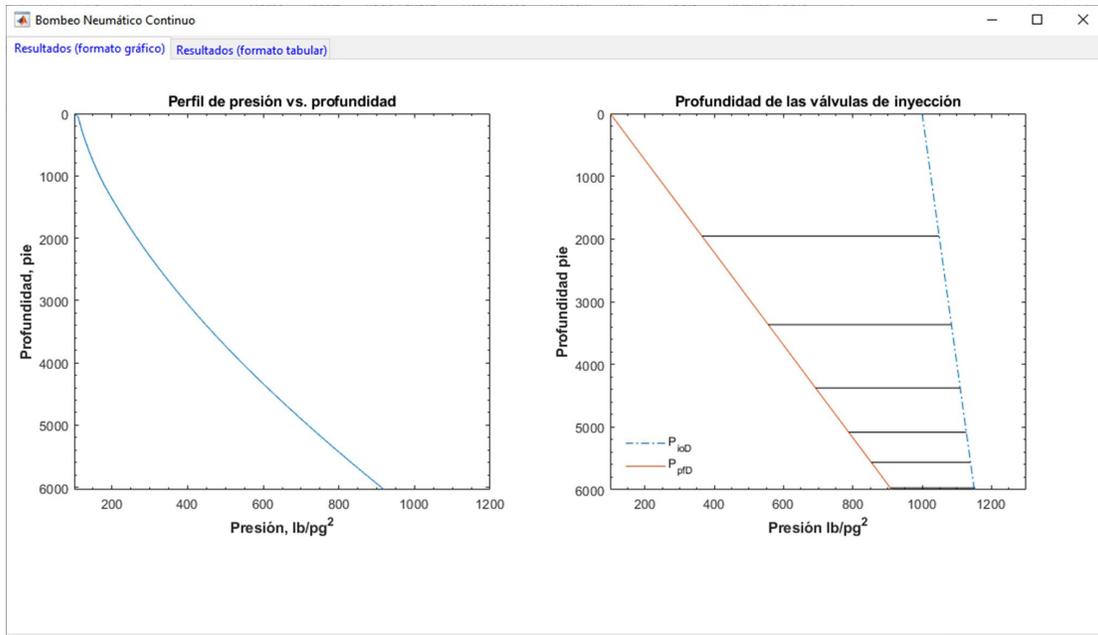
**Figura 5.4** Ventana del explorador para búsqueda del archivo de datos de entrada.

Válvulas y TP		Producción/Inyección		Presión y Temperatura	
Área de fuelles [pg <sup>2</sup> ]	0.77	Densidad del aceite [° API]	35	Inyección diaria [ $\frac{Mpc^3}{d}$ ]	500
Distancia mínima [pie]	150	Densidad del agua [adim]	1.08	Inyección máxima [ $\frac{Mpc^3}{d}$ ]	800
Diámetro externo [pg]	1.5	Densidad del gas [adim]	0.65	Gradiente de carga [ $\frac{lb}{pg^2 \cdot pie}$ ]	0.46
Profundidad máxima [pie]	5970	Entrada de agua [adim]	0.5	RGA de la formación [ $\frac{pc^3}{bb}$ ]	500
Decremento de presión [ $\frac{lb}{pg^2}$ ]	20	Producción diaria [ $\frac{bb}{d}$ ]	800	Presión de arranque [ $\frac{lb}{pg^2}$ ]	1000
Diferencial de presión [ $\frac{lb}{pg^2}$ ]	50			Temperatura de fondo [° F]	170
Longitud total de la TP [pie]	6000			Presión en la cabeza [ $\frac{lb}{pg^2}$ ]	100
Diámetro de la TP [pg]	2.875			Temperatura del gas [° F]	100
				Presión de fondo [ $\frac{lb}{pg^2}$ ]	1800
				Temperatura de calibración [° F]	60
				Presión del gas [ $\frac{lb}{pg^2}$ ]	1000
				Temperatura en la cabeza [° F]	100

**Figura 5.5** Configuración de los datos de entrada para los cálculos de diseño del BNC.

Una vez que el usuario ha ingresado todos los datos de entrada, al oprimir el botón con la leyenda “Continuar”, se despliega la interfaz gráfica con los resultados del programa (**Figura 5.6**). En la pestaña “Resultados (formato gráfico)” se presenta el perfil de la presión calculada en el pozo, así como una gráfica de presión vs. profundidad en que se indican las profundidades calculadas de colocación de las válvulas, junto con los perfiles obtenidos de presión del gas en la TR y de los fluidos en la TP.

Por otra parte, como se muestra en la **Figura 5.7**, en la pestaña “Resultados (formato tabular)” se despliega una tabla con los valores calculados para el diámetro de puerto de las válvulas, la presión del gas de inyección, la presión de los fluidos en la TP, la presión inicial de apertura, la presión de los fuelles, la temperatura de descarga, el factor de corrección por temperatura y la presión de apertura en banco de calibración. Cabe destacar para la válvula más profunda, que será la operante, se asume que es de orificio, por lo que únicamente se indican las presiones en TR y TP correspondientes.



**Figura 5.6** Resultados gráficos para el diseño de BNC.

Resultados (formato gráfico) Resultados (formato tabular)

Diámetro de puerto = 0.25 pulgadas

Número de válvula	Profundidad, ft	Presión del gas de inyección, psi	Presión mínima de los fluidos de producción, psi	Presión inicial de apertura, psi	Presión de los fuelles, psi	Temperatura de descarga, °F	Factor de corrección de temperatura	Presión de apertura en banco de calibración, psi
1	1954.4	1049.0	364.59	1049.0	1005.4	122.80	0.8763	941.00
2	3367.2	1084.5	555.85	1064.4	1032.0	139.28	0.8489	935.71
3	4375.8	1109.8	692.39	1069.6	1045.5	151.05	0.8305	927.49
4	5082.6	1127.5	788.07	1067.2	1049.4	159.30	0.8183	917.16
5	5564.2	1139.6	853.27	1059.2	1046.1	164.92	0.8102	905.23
6	5970	1149.8	908.21*	*	*	*	*	*

\* Se usa una válvula de orifici

**Figura 5.7** Tabla de resultados para el diseño de BNC.

### 5.1.2 Configuración para el diseño de BNI

Cuando el usuario elige la opción “*Bombeo Neumático Intermitente*” en la interfaz principal (Figura 5.1), se despliega la interfaz para la entrada de datos correspondientes al diseño del BNI, mostrada en la Figura 5.8. Las funciones de los botones “Aviso” y “*Archivo de Datos*” son las mismas que las descritas en la sección anterior.

The screenshot shows a software window titled "Bombeo Neumático Intermitente" with a light gray background. It is divided into four main sections, each with a title and several input fields:

- Válvulas y TP:** Includes fields for "Área de fuelles [pg<sup>2</sup>]" (0.77), "Diámetro de puerto [pg]" (0.5), "Distancia mínima [pie]" (350), "Diámetro de la TP [pg]" (2.875), "Longitud total de la TP [pie]" (6000), and "Profundidad máxima [pie]" (5950).
- Presión y Temperatura:** Includes fields for "Presión en la cabeza [ $\frac{lb}{pg^2}$ ]" (100), "Presión del gas [ $\frac{lb}{pg^2}$ ]" (800), "Temperatura del gas [°F]" (80), "Temperatura en la cabeza [°F]" (80), and "Temperatura de fondo [°F]" (170).
- Fluidos:** Includes fields for "Densidad del gas [adim]" (0.65), "Gradiente de carga [ $\frac{lb}{pg^2 \cdot pie}$ ]" (0.45), and "Producción diaria [ $\frac{bbt}{d}$ ]" (300). Below these fields are two buttons: "Archivo de Datos" and "Aviso".
- Método:** Contains two radio button options: "Gradiente de retroceso" (unselected) and "Porcentaje de carga" (selected).
- Variante:** Contains two checkbox options: "Relación 60/60" (unselected) and "Relación 40/60" (unselected). Below this section is a "Continuar" button.

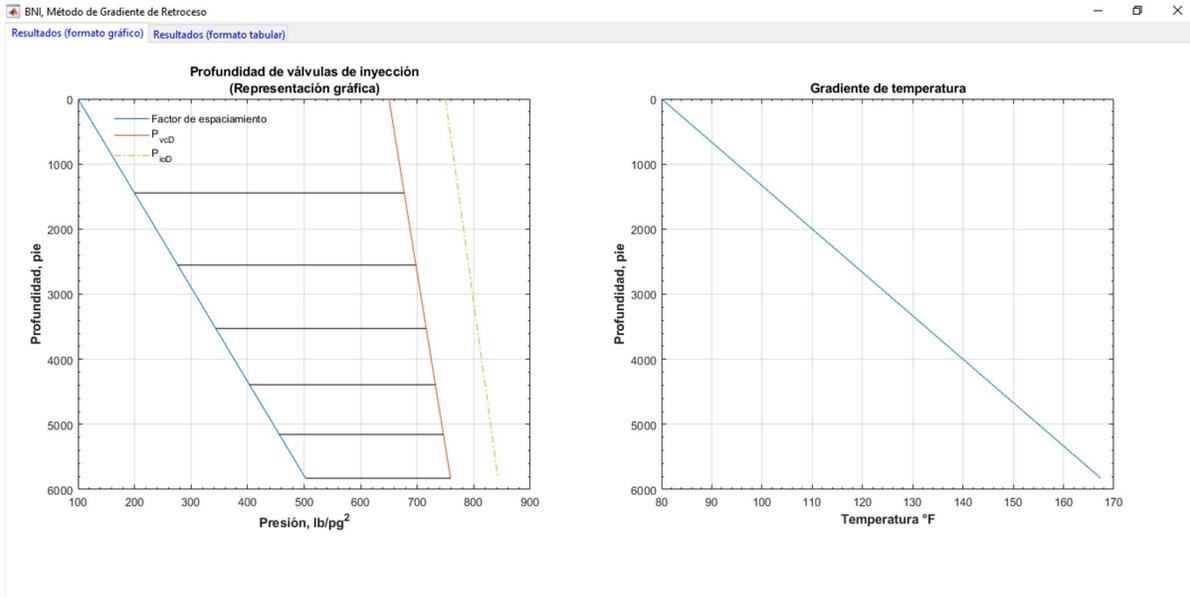
**Figura 5.8** Configuración de los datos de entrada para los cálculos de diseño del BNI.

Luego de ingresar los datos de entrada, al oprimir el botón “*Continuar*”, se activan las opciones correspondientes a los métodos de diseño disponibles: “*Gradiente de retroceso*” y “*Porcentaje de carga*”, conforme a lo descrito en el capítulo 4.

Si el usuario elige el método “*Gradiente de retroceso*”, la aplicación despliega una ventana con los resultados respectivos. Por otra parte, si elige el método “*Porcentaje de carga*” se activan dos opciones a considerar en el diseño en cuanto a los porcentajes de la presión del gas en la superficie y en el fondo, siendo la más común la correspondiente al 40% y 60%, respectivamente.

Independientemente del método de diseño del BNI, la herramienta despliega una interfaz con los resultados gráficos y numéricos obtenidos, similares a las correspondientes al diseño del BNC descritas en la sección anterior.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el diseño con el método de “*Gradiente de retroceso*” (**Figuras 5.9 y 5.10**), el método de “*Porcentaje de carga*”, tanto para una relación de presiones 60/60 (**Figuras 5.11 y 5.12**), y 40/60 (**Figuras 5.13 y 5.14**).



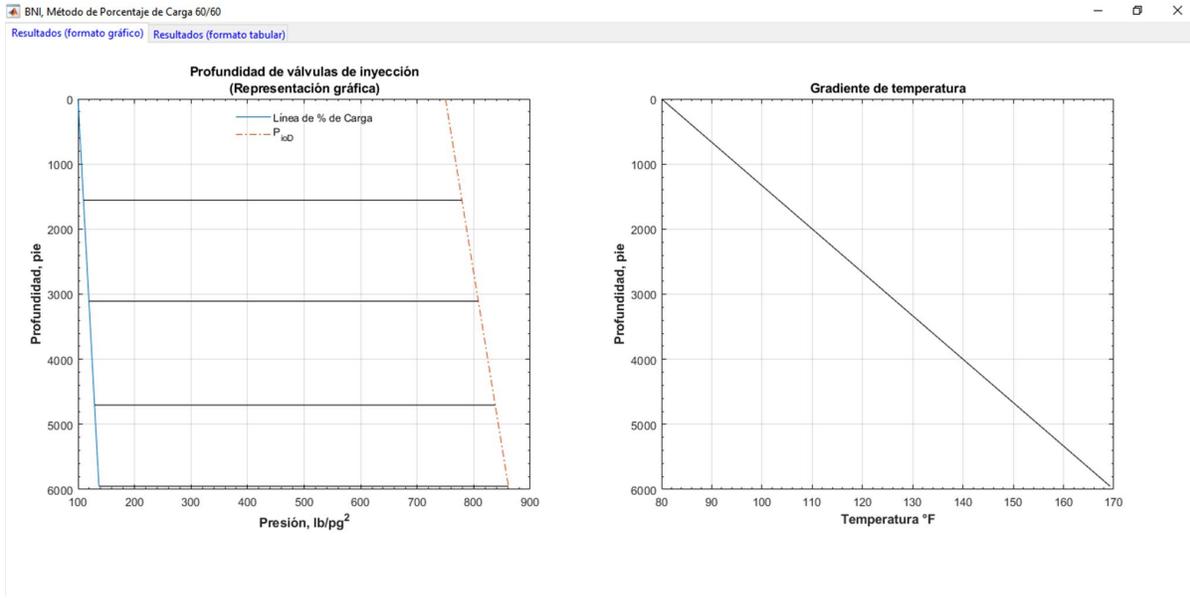
**Figura 5.9** Resultados gráficos para el diseño de BNI con el método de “*Gradiente de retroceso*”.

The screenshot shows the software interface with a table of results. The table has 8 columns: Numero de válvula, Profundidad, ft, Distancia entre válvulas, ft, Presión mínima de descarga, psi, Presión de cierre, psi, Temperatura de descarga, °F, Factor de corrección de temperatura, and Presión de apertura, °F.

Numero de válvula	Profundidad, ft	Distancia entre válvulas, ft	Presión mínima de descarga, psi	Presión de cierre, psi	Temperatura de descarga, °F	Factor de corrección de temperatura	Presión de apertura, °F
1	1444.4	1106.5	199.77	677.01	101.67	0.9172	833.50
2	2551.0	977.27	276.20	697.70	118.26	0.8878	831.47
3	3528.2	863.13	343.70	715.97	132.92	0.8634	829.79
4	4391.4	762.32	403.32	732.11	145.87	0.8430	828.38
5	5153.7	673.29	455.98	746.37	157.31	0.8257	827.20
6	5827.0	502.48	502.48	758.96	167.40	0.8110	826.1913*

\* Añadir una caída de presión de 20 psi

**Figura 5.10** Tabla de resultados para el diseño de BNI con el método de “*Gradiente de retroceso*”.



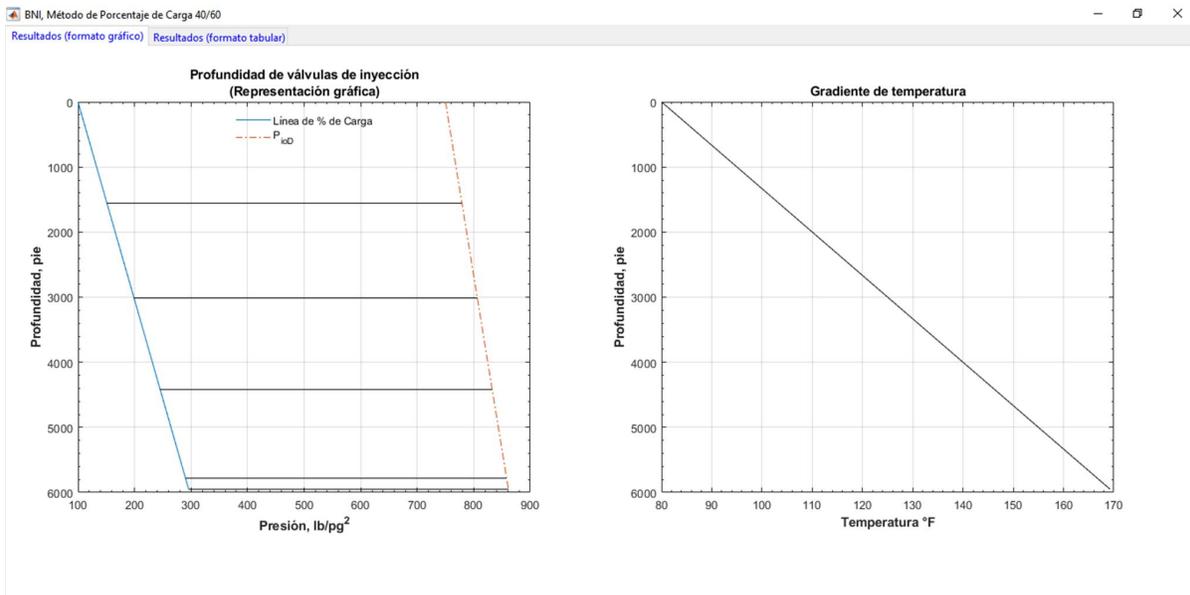
**Figura 5.11** Resultados gráficos para el diseño de BNI en el método de “Porcentaje de carga” para una relación 60/60.

The screenshot shows the software interface with a table of results. The table has 8 columns: Numero de válvula, Profundidad, ft, Distancia entre válvulas, ft, Presión mínima de descarga, psi, Presión de cierre, psi, Temperatura de descarga, °F, Factor de corrección de temperatura, and Presión de apertura, °F.

Numero de válvula	Profundidad, ft	Distancia entre válvulas, ft	Presión mínima de descarga, psi	Presión de cierre, psi	Temperatura de descarga, °F	Factor de corrección de temperatura	Presión de apertura, °F
1	1555.6	1552.1	109.67	779.09	103.33	0.9133	955.11
2	3107.6	1597.0	119.33	808.11	126.61	0.8727	946.58
3	4704.6	1643.2	129.26	837.97	150.57	0.8345	938.60
4	5950		137.00	861.26	169.25	0.8070	932.8831*

Below the table, there is a note: "\* Añadir una caída de presión de 25 psi".

**Figura 5.12** Tabla de resultados para el diseño de BNI con el método de “Porcentaje de carga” para una relación 60/60.



**Figura 5.13** Resultados gráficos para el diseño de BNI con el método de “*Porcentaje de carga*” para una relación 40/60.

The figure shows a software interface with a table of results. The table has 8 columns: Numero de válvula, Profundidad, ft, Distancia entre válvulas, ft, Presión mínima de descarga, psi, Presión de cierre, psi, Temperatura de descarga, °F, Factor de corrección de temperatura, and Presión de apertura, °F.

Numero de válvula	Profundidad, ft	Distancia entre válvulas, ft	Presión mínima de descarga, psi	Presión de cierre, psi	Temperatura de descarga, °F	Factor de corrección de temperatura	Presión de apertura, °F
1	1555.6	1455.9	151.16	779.09	103.33	0.9133	955.11
2	3011.5	1408.0	199.03	806.31	125.17	0.8751	947.08
3	4419.5	1361.7	245.34	832.64	146.29	0.8410	939.97
4	5781.2	1316.9	290.12	858.10	166.72	0.8106	933.64
5	5950		295.67	861.26	169.25	0.8070	932.8831*

\* Añadir una caída de presión de 25 psi

**Figura 5.14** Tabla de resultados para el diseño de BNI con el método de “*Porcentaje de carga*” para una relación 40/60.

## 5.2 Verificación de los resultados del programa de cómputo

Con la finalidad de verificar los resultados del programa de cómputo desarrollado para automatizar los cálculos del diseño de los sistemas de bombeo neumático, se utilizó la información de dos pozos reportados por Winkler y Blann (2007), uno con BNC y otro con BNI, como se describe a continuación.

### 5.2.1 Bombeo neumático continuo

Para el sistema de BNC reportado por Winkler y Blann (2007), los datos de entrada son los que se indican en la **Tabla 5.3**.

Variable	Valor/Unidad
Área de los fuelles de las válvulas, $A_b$	0.77 pg <sup>2</sup>
Decremento mínimo de presión entre válvulas, $\Delta P_{io}$	20 lb/pg <sup>2</sup>
Densidad del aceite, $\rho_o$	35 °API
Densidad del agua producida, $\gamma_w$	1.08;
Densidad del gas, $\gamma_g$	0.65
Diámetro de la TP, $d$	2.875 pg
Diámetro externo de las válvulas, $\Phi_{ext}$	1.5 pg
Diferencial de presión en espaciamiento de válvulas, $\Delta P_{sD}$	50 lb/pg <sup>2</sup>
Distancia mínima entre válvulas, $D_{bv min}$	150 pie
Entrada de agua, $f_w$	0.5
Gasto diario de gas de inyección, $q_{gi}$	500 Mpcd
Gasto máximo de descarga de gas de inyección, $q_{giu}$	800 Mpcd
Gradiente de presión del fluido de carga, $G_{Is}$	0.46 lb/pg <sup>2</sup> /pie

**Tabla 5.3** Datos de entrada para verificar los resultados del programa en el caso de un pozo con BNC (Modificado de Winkler y Blann, 2007).

Variable	Valor/Unidad
Longitud de la TP, $D$	6000 pie
Presión de arranque del gas de inyección, $P_{ko}$	1000 lb/pg <sup>2</sup>
Presión en la cabeza del pozo, $P_{wh}$	100 lb/pg <sup>2</sup>
Presión estática en el fondo del pozo, $P_{ws}$	1800 lb/pg <sup>2</sup>
Presión superficial del gas de inyección, $P_{io}$	1000 lb/pg <sup>2</sup>
Producción diaria, $q_{it}$	800 bpd
Profundidad máxima de válvula, $D_{v max}$	5970 pie
Relación gas-aceite de la formación, $R_{go}$	500 pcpb
Temperatura de fondo del pozo, $T_{ws}$	170 °F
Temperatura del gas de inyección en la cabeza del pozo, $T_{gio}$	100 °F
Temperatura en banco de calibración, $T_{vo}$	60 °F
Temperatura en la cabeza del pozo, $T_{wh}$	100 °F

**Tabla 5.3 (Continuación)** Datos de entrada para verificar los resultados del programa en el caso de un pozo con BNC (Modificado de Winkler y Blann, 2007).

En la **Tabla 5.4**, se presentan los resultados del caso de diseño del BNC reportado en Winkler y Blann (2007). Por otra parte, los resultados obtenidos mediante el programa de cómputo desarrollado en este trabajo se muestran en la **Tabla 5.5**.

A partir de los resultados obtenidos, en la **Tabla 5.6** se indican los errores relativos máximos correspondientes a los diferentes parámetros del diseño de BNC calculados con el programa. Como puede observarse, presentan un buen acuerdo con los resultados de Winkler y Blann (2007); para todos los parámetros, el error relativo máximo es menor de 3.5%. De esta manera, se verifica que los cálculos del programa en cuanto al diseño del BNC son satisfactorios, considerando que se desconocen los métodos utilizados por los autores citados para calcular las propiedades de los fluidos y los gradientes de presión en flujo multifásico.

Válvula	D <sub>v</sub> (pie)	P <sub>ioD</sub> (psi)	P <sub>pfD min</sub> (psi)	P <sub>oD</sub> (psi)	P <sub>bvD</sub> (psi)	T <sub>vD</sub> (°F)	C <sub>T</sub>	P <sub>tro</sub> (psi)
1	1957	1050	361	1050	1006	123	0.876	942
2	3429	1088	557	1068	1035	140	0.847	937
3	4490	1115	699	1075	1051	152	0.828	929
4	5242	1135	799	1075	1057	161	0.814	919
5	5762	1148	868	1068	1055	167	0.805	907
6	5970	1153	896	*	*	*	*	*

**Tabla 5.4** Resultados de Winkler y Blann (2007) para el caso analizado de diseño del BNC.

Válvula	D <sub>v</sub> (pie)	P <sub>ioD</sub> (psi)	P <sub>pfD min</sub> (psi)	P <sub>oD</sub> (psi)	P <sub>bvD</sub> (psi)	T <sub>vD</sub> (°F)	C <sub>T</sub>	P <sub>tro</sub> (psi)
1	1954.4	1049.0	364.59	1049.0	1005.4	122.80	0.8763	941.00
2	3367.2	1084.5	555.85	1064.4	1032.0	139.28	0.8489	935.71
3	4375.8	1109.8	692.39	1069.6	1045.5	151.05	0.8305	927.49
4	5082.6	1127.5	788.07	1067.2	1049.4	159.30	0.8183	917.16
5	5564.2	1139.6	853.27	1059.2	1046.1	164.92	0.8102	905.23
6	5970	1149.8	908.21	*	*	*	*	*

**Tabla 5.5** Resultados obtenidos con el programa de cómputo desarrollado en este trabajo para el caso de diseño del BNC reportado por Winkler y Blann (2007).

Parámetro de diseño	Error relativo máximo
Profundidad de las válvulas, $D_v$	3.4%
Presión del gas de inyección, $P_{ioD}$	0.7%
Presión mínima de los fluidos de producción, $P_{pfmin}$	1.7%
Presión inicial de apertura, $P_{oD}$	0.8%
Presión de los fuelles, $P_{bvD}$	0.8%
Temperatura de descarga, $T_{vD}$	1.3%
Factor de corrección de temperatura, $C_T$	0.7%
Presión de apertura en banco de calibración, $P_{tro}$	0.2%

**Tabla 5.6** Errores relativos máximos correspondientes a los diversos parámetros del diseño de BNC con el programa de cómputo, para el caso reportado por Winkler y Blann (2007).

### 5.2.2 Bombeo neumático intermitente

En la **Tabla 5.7** se indican los datos de Winkler y Blann (2007) para el diseño de un pozo con BNI, utilizados para verificar los resultados del programa desarrollado.

Variable	Valor/Unidad
Área de fuelles de las válvulas, $A_b$	0.77 pg <sup>2</sup>
Densidad del gas, $g_g$	0.65
Diámetro de la TP, $d$	2.875 pg
Diámetro interno de puerto de las válvulas, $\phi_{int}$	0.5 pg
Distancia mínima entre válvulas, $D_{bv min}$	350 pie
Gradiente de presión del fluido de carga, $G_{ls}$	0.45
Longitud total de la TP, $D$	6000 pie
Presión en la cabeza del pozo, $P_{wh}$	100 lb/pg <sup>2</sup>
Presión superficial del gas de inyección, $P_{io}$	800 lb/pg <sup>2</sup>
Presión en la cabeza del pozo, $P_{wh}$	100 lb/pg <sup>2</sup>
Producción diaria, $q_{lt}$	300 bpd
Profundidad máxima de la válvula, $D_{v max}$	5950 pie
Temperatura de fondo del pozo, $T_{ws}$	170 °F
Temperatura del gas de inyección en la cabeza del pozo, $T_{gio}$	80 °F
Temperatura en la cabeza del pozo, $T_{wh}$	80 °F

**Tabla 5.7** Datos de entrada para verificar los resultados del programa en el caso de un pozo con BNI (Modificado de Winkler y Blann, 2007)

Los resultados correspondientes al caso de diseño del BNI reportados en Winkler y Blann (2007), se indican en la **Tabla 5.8**. En cuanto a los resultados obtenidos con el programa de cómputo desarrollado, estos se presentan en la **Tabla 5.9**.

Válvula	$D_v$ (pie)	$D_{bv}$ (pie)	$P_{pfD min}$ (psi)	$P_{vcD}$ (psi)	$T_{vD}$ (°F)	$C_T$	$P_{tro}$ (psi)
1	1556	1137	215	707	103	0.914	868
2	2693	987	299	726	120	0.884	862
3	3680	857	372	743	135	0.860	857
4	4537	744	436	758	148	0.839	854
5	5281	647	491	771	159	0.823	851
6	5928	*	539	732	169	0.809	829

**Tabla 5.8** Resultados de Winkler y Blann (2007) para el caso analizado de diseño del BNI con el método de gradiente de retroceso.

Válvula	$D_v$ (pie)	$D_{bv}$ (pie)	$P_{pfD min}$ (psi)	$P_{vcD}$ (psi)	$T_{vD}$ (°F)	$C_T$	$P_{tro}$ (psi)
1	1444.4	1106.5	199.77	677.01	101.67	0.9172	833.50
2	2551.0	977.27	276.20	697.70	118.26	0.8878	831.47
3	3528.2	863.13	343.70	715.97	132.92	0.8634	829.79
4	4391.4	762.32	403.32	732.11	145.87	0.8430	828.38
5	5153.7	673.29	455.98	746.37	157.31	0.8257	827.20
6	5827.0	*	502.48	758.96	167.40	0.8110	826.19*

**Tabla 5.9** Resultados obtenidos con el programa de cómputo desarrollado en este trabajo para el caso del diseño de BNI con el método de gradiente de retroceso, reportado por Winkler y Blann (2007).

Los errores relativos máximos correspondientes a los diferentes parámetros del diseño de BNI calculados con el programa se indican en la **Tabla 5.10**. Como puede observarse, en general, estos son menores de 4.2%, excepto en la predicción de la profundidad de las válvulas y en la presión mínima de descarga, para los cuales es del orden de 7%. Considerando que los resultados pueden variar debido a las correlaciones PVT y de flujo multifásico utilizadas, puede concluirse que los cálculos de la herramienta de cómputo para el diseño del BNI son aceptables.

Parámetro de diseño	Error relativo máximo
Profundidad, $D_v$	7.2%
Distancia entre válvulas, $D_{bv}$	4.1%
Presión mínima de descarga, $P_{pfD min}$	7.6%
Presión de cierre de la válvula, $P_{vcD}$	4.2%
Temperatura de descarga, $T_{vD}$	1.5%
Factor de corrección de temperatura, $C_T$	0.5%
Presión de apertura en banco de calibración, $P_{tro}$	4.0%

**Tabla 5.10** Errores relativos máximos correspondientes a los diversos parámetros del diseño de BNI calculados con el método de gradiente de retroceso en el programa de cómputo, para el caso reportado por Winkler y Blann (2007).

## Capítulo 6

# Estudios paramétricos

En este capítulo, se presenta un estudio paramétrico con variables selectas de un pozo típico con BNC. Para tal efecto, se realizan simulaciones con la herramienta de cómputo desarrollada en este trabajo. Como variables de sensibilidad, se considera el corte de agua, la presión en la cabeza del pozo, la densidad relativa del gas de inyección y el diámetro de la TP; en todos los casos, se estudia su efecto sobre el perfil de la presión en el pozo, así como en el número y profundidad de colocación de las válvulas de BN. Finalmente, se presenta una discusión sobre la presión de inyección y los requerimientos de compresión en el diseño de los sistemas de BNC.

### 6.1 Caso base

Como caso base del estudio paramétrico que se presenta en las secciones siguientes, se consideró el pozo con BNC descrito en la sección 5.2.1 del capítulo anterior, reportado por Winkler y Blann (2007). Datos adicionales sobre el diámetro de la TR y la TP, así como de la presión de succión del compresor y la profundidad de inyección, se indican la **Tabla 6.1**. Cabe resaltar que en los estudios paramétricos que se discuten más adelante únicamente se consideró la hidráulica en espacio anular y la sarta de producción; en trabajos futuros, se recomienda incorporar en los análisis la respuesta de otros elementos del sistema integral de producción en su conjunto.

Variable	Valor/Unidad
Presión de succión del compresor, $P_s$	200 lb/pg <sup>2</sup>
Longitud desarrollada al punto de inyección, $D_{mi}$	5970 pie
Profundidad vertical del punto de inyección, $D_{vi}$	5970 pie
Diámetro exterior de la TR, $d_{ce}$	6.625 pg
Diámetro interior de la TR, $d_{ci}$	6.065 pg
Diámetro interior de la TP, $d_{ti}$	2.259 pg
Eficiencia de compresión, $E_c$	0.8

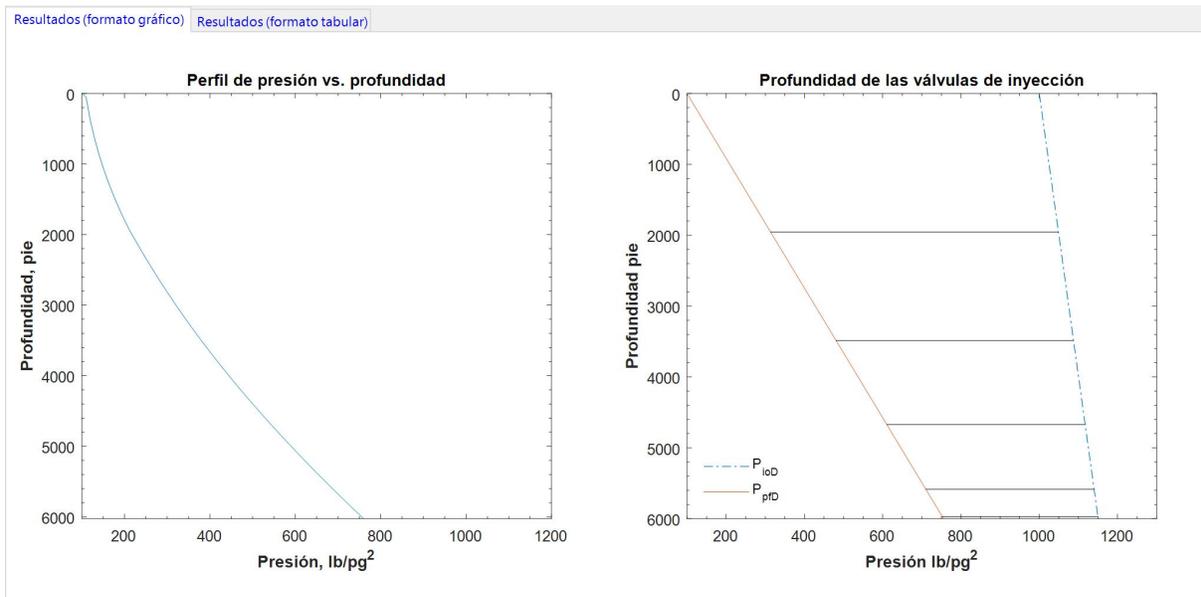
**Tabla 6.1** Información adicional del pozo con BNC considerada en la definición del caso base para el estudio paramétrico.

## 6.1 Efecto del corte de agua

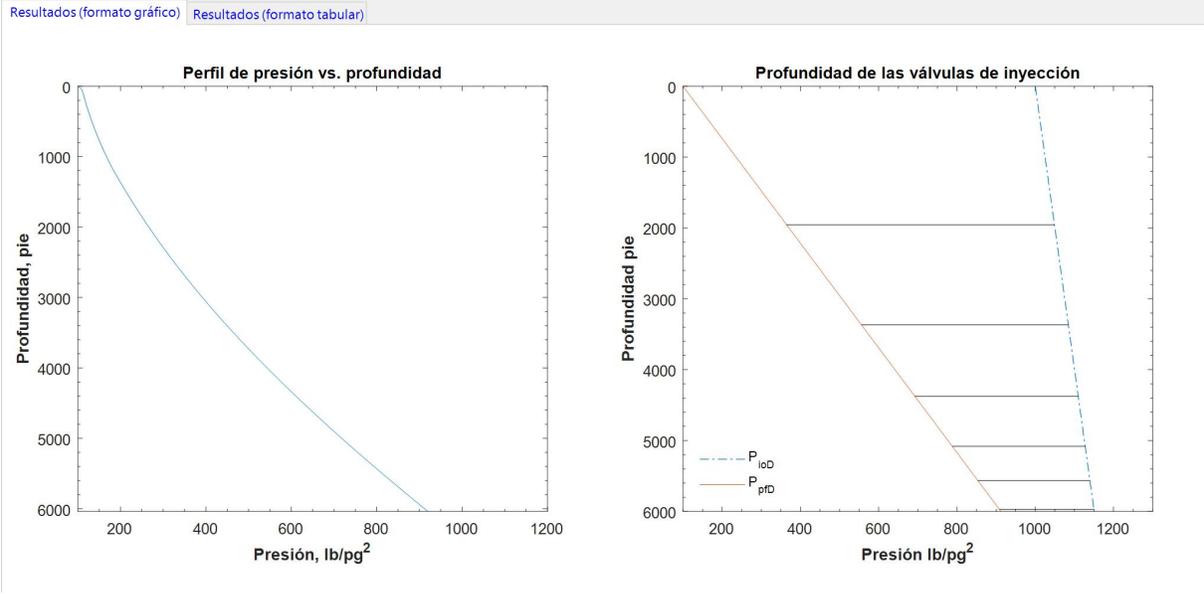
Para analizar el efecto del corte en el perfil de la presión en el pozo, así como en el número de válvulas de descarga requeridas, se consideraron valores de 40%, 50% (caso base) y 60%. Los resultados obtenidos se presentan en las **Figuras 6.1, 6.2 y 6.3**, respectivamente. Como puede observarse, la presión en el pozo se incrementa al aumentar el corte de agua y se requiere un número mayor de válvulas para alcanzar la máxima profundidad de inyección.

En el estudio paramétrico realizado, cabe destacar que se mantuvieron constantes los gastos de gas de inyección y de líquido (agua+aceite) y, por lo tanto, también la RGL; por lo que, el gasto de aceite varía con el corte de agua en los casos analizados. En consecuencia, al aumentar el corte de agua, el gasto de aceite disminuye y aumenta el gasto de agua y, como resultado, la densidad de la mezcla aumenta; esto deriva en el incremento de la presión del pozo y en que se requiera un mayor número de válvulas en el diseño del sistema para alcanzar la misma profundidad máxima de inyección como se observa en las **Figuras 6.1 a 6.3**.

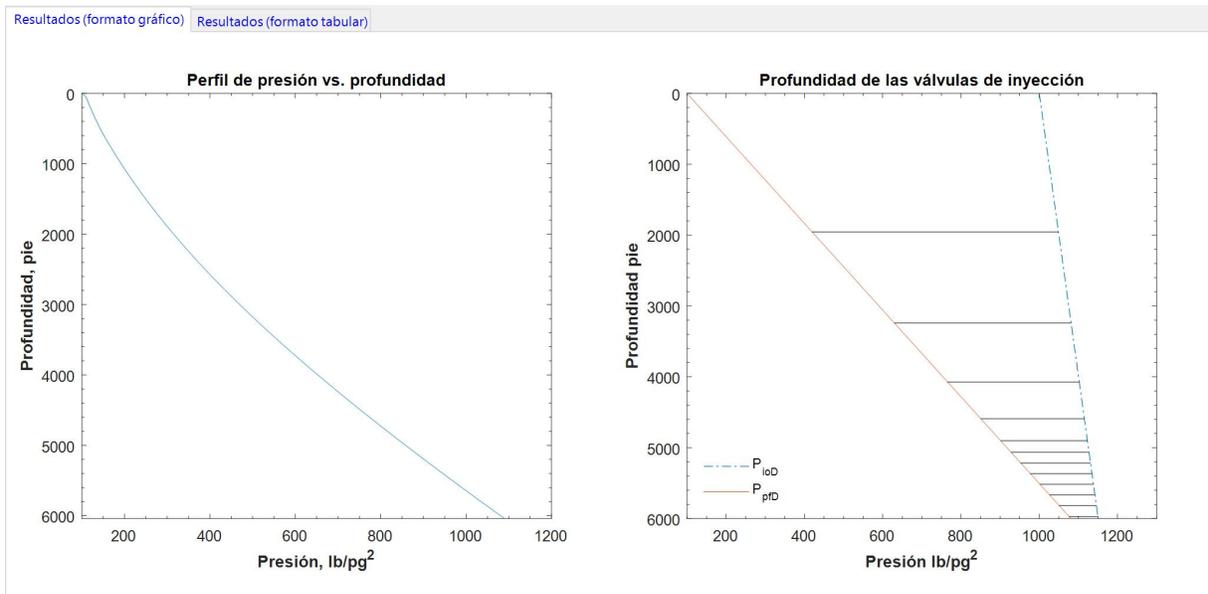
Por otra parte, al considerar que el perfil de presión en el espacio anular se mantiene constante, entonces la caída de presión en la válvula operante disminuye conforme aumenta el corte de agua. Por lo tanto, puede ocurrir que esta caída de presión disminuya por debajo del valor mínimo recomendado por el API de 100 lb/pg<sup>2</sup> (sección 3.2), lo cual se presentó en el caso correspondiente al corte de agua de 60% (**Figura 6.3**)



**Figura 6.1** Efecto de corte de agua - 40%.



**Figura 6.2** Efecto de corte de agua - 50%.

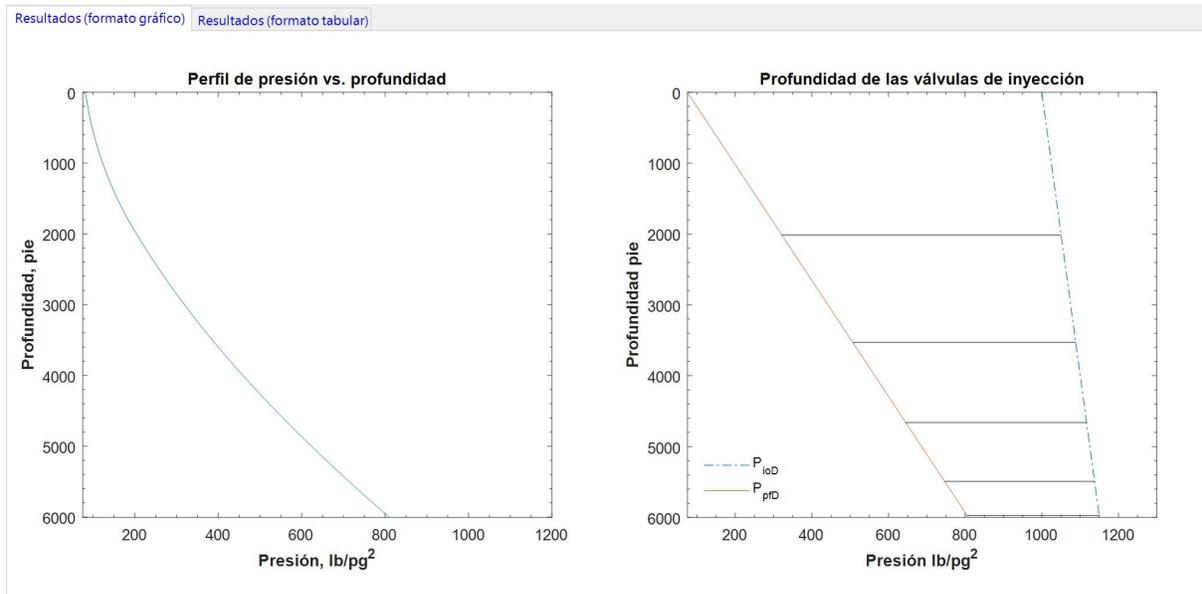


**Figura 6.3** Efecto de corte de agua - 60%.

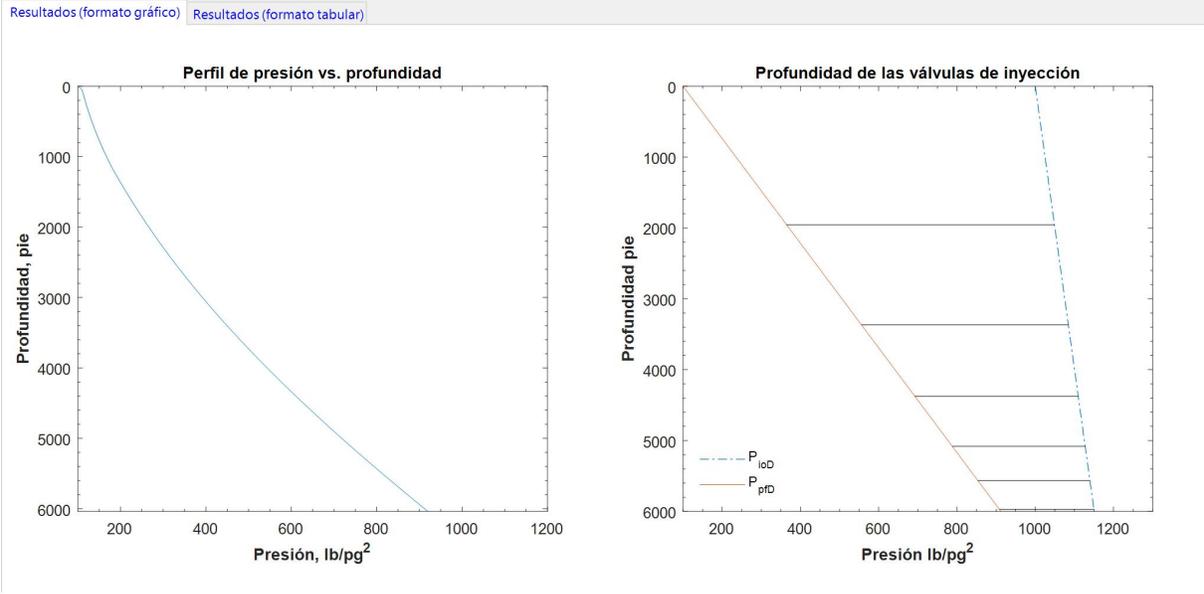
## 6.2 Efecto de la presión en la cabeza del pozo

En este estudio paramétrico, se analizó el efecto de la presión en la cabeza del pozo sobre el perfil de la presión y el número de válvulas de descarga. Se consideraron valores de 75 lb/pg<sup>2</sup>, 100 lb/pg<sup>2</sup> (caso base) y 125 lb/pg<sup>2</sup>. En las **Figuras 6.4, 6.5 y 6.6** se muestran los respectivos resultados obtenidos. Como revela la comparación de las figuras, el espaciamiento entre las válvulas de descarga se reduce si aumenta la presión en la cabeza del pozo; como resultado, se incrementa el número de válvulas requeridas.

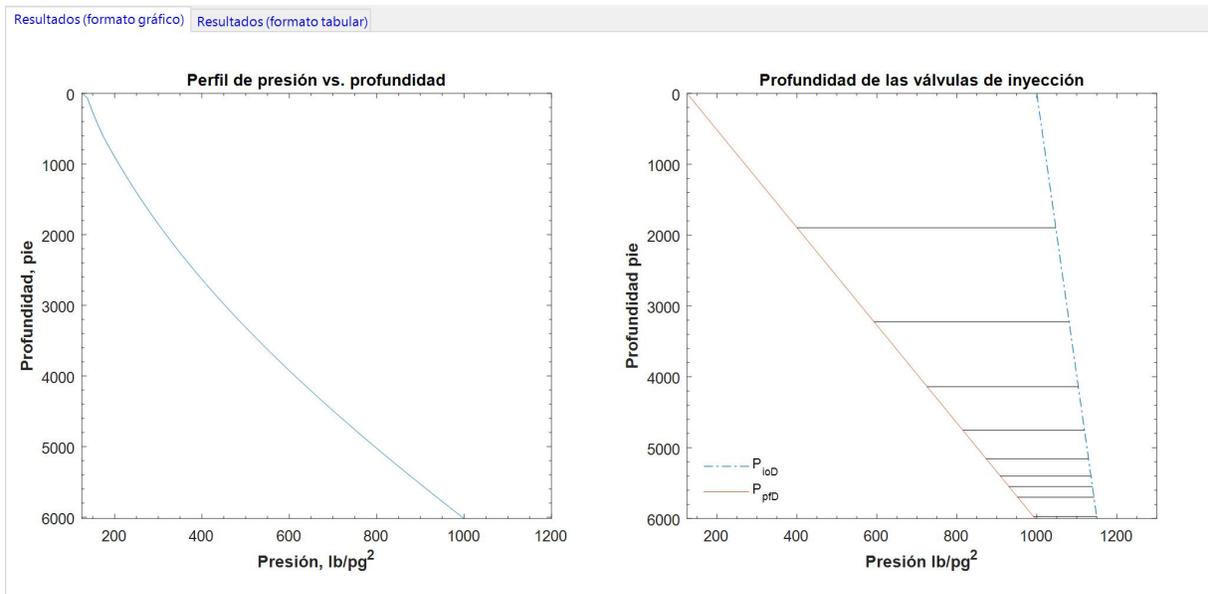
Por otra parte, de acuerdo con las figuras, se observa que la presión en el pozo se incrementa al aumentar la presión en la cabeza del pozo y la caída de presión en la válvula operante disminuye. Estos resultados se atribuyen principalmente a que hay menos gas libre asociado en el aceite en la tubería de producción debido al incremento de la presión en la superficie



**Figura 6.4** Efecto de presión en la cabeza del pozo - 75 lb/pg<sup>2</sup>.



**Figura 6.5** Efecto de presión en la cabeza del pozo - 100 lb/pg<sup>2</sup>.

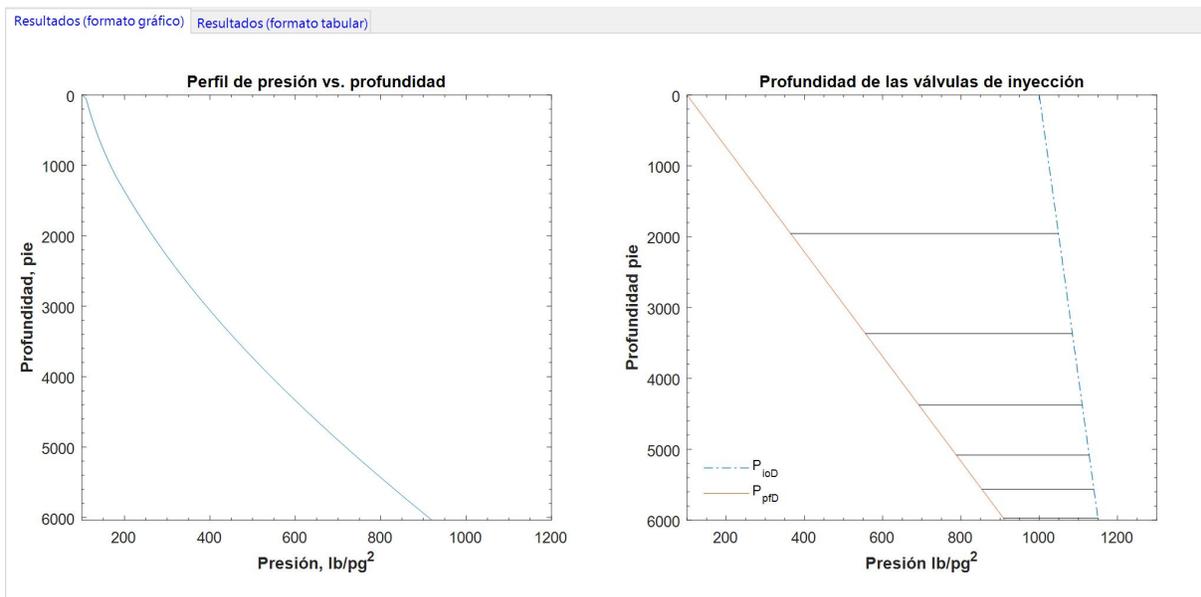


**Figura 6.6** Efecto de presión en la cabeza del pozo - 125 lb/pg<sup>2</sup>.

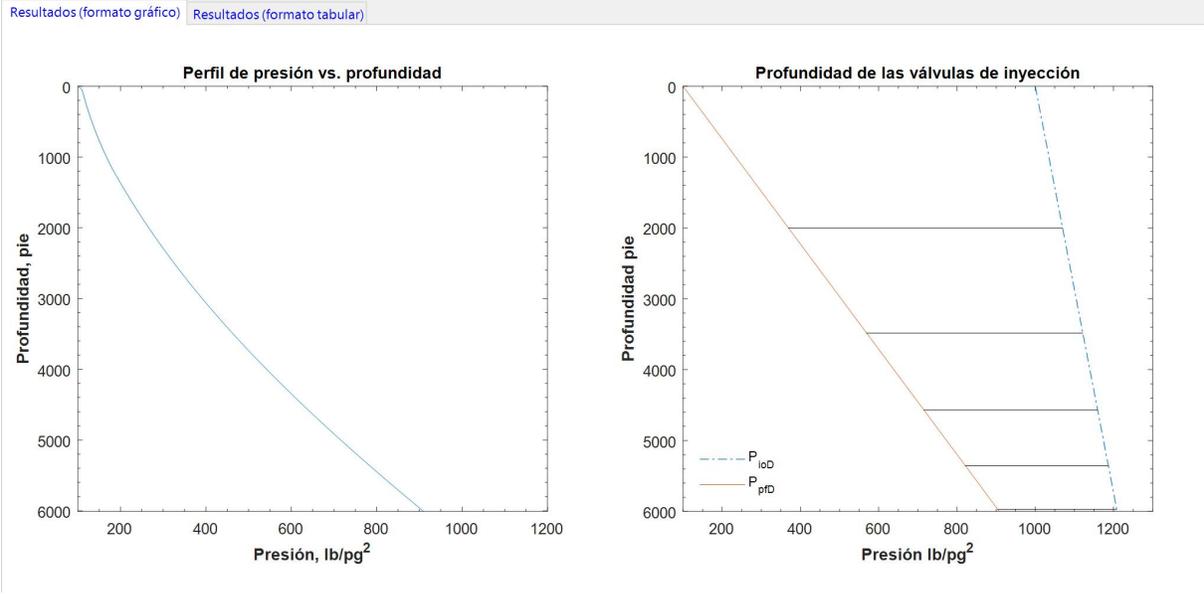
### 6.3 Efecto de la densidad relativa del gas de inyección

Para determinar el efecto de la densidad relativa del gas de inyección sobre el perfil de la presión en el pozo y el espaciamiento de las válvulas de descarga, se consideraron valores para dicho parámetro de 0.65 (caso base), 0.8 y 0.9. Los resultados correspondientes a cada caso, se muestran en las **Figuras 6.7, 6.8 y 6.9**, respectivamente. Como puede observarse, la presión en el espacio anular se incrementa conforme la densidad relativa del gas de BN aumenta; esto se explica porque la carga hidrostática en la TR crece. Observar también que la caída de presión en la válvula operante aumenta bajo tales condiciones.

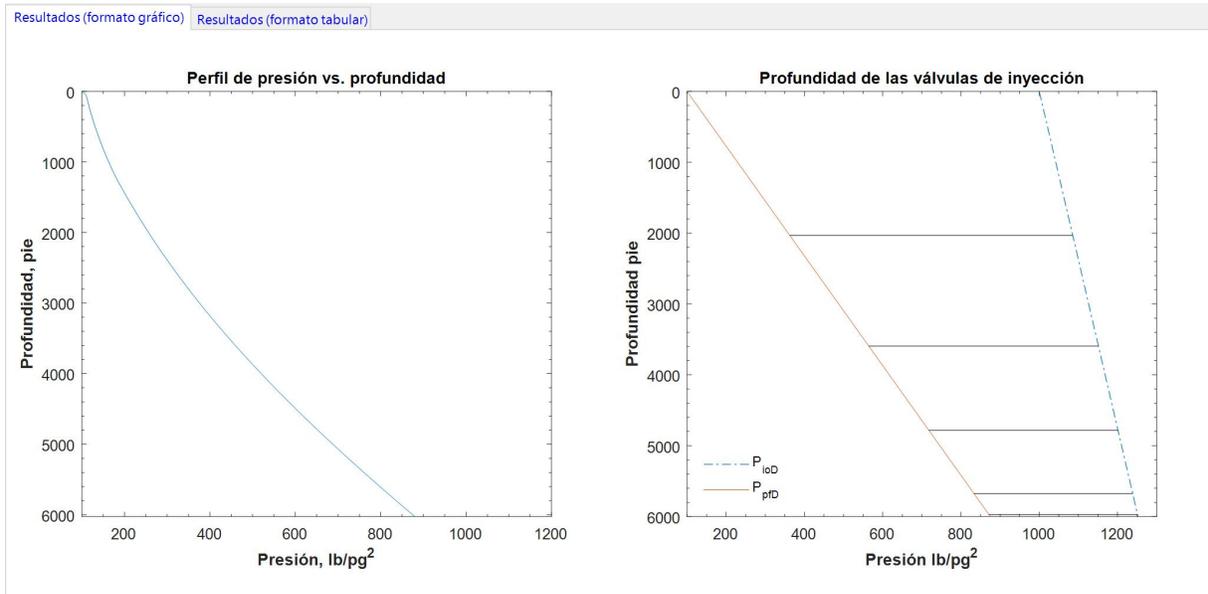
Por otra parte, la presión en la sarta de producción disminuye y el espaciamiento entre las válvulas de descarga aumenta (se requieren menos válvulas) con el incremento de la densidad relativa del gas de inyección; para los casos analizados, esto se atribuye a que el colgamiento tiende a disminuir conforme se reduce la diferencia de densidad entre el líquido y el gas de inyección; como resultado, la carga hidrostática disminuye.



**Figura 6.7** Efecto de densidad relativa del gas de inyección - 0.65.



**Figura 6.8** Efecto de densidad relativa del gas de inyección - 0.8.



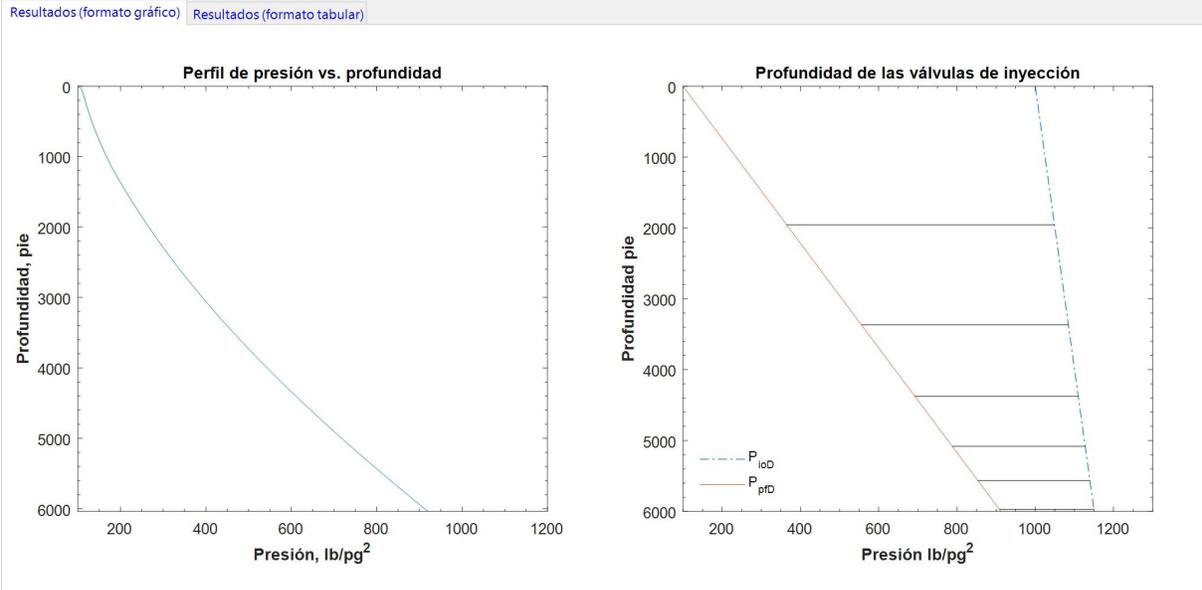
**Figura 6.9** Efecto de densidad relativa del gas de inyección - 0.9.

## 6.4 Efecto del diámetro de la TP

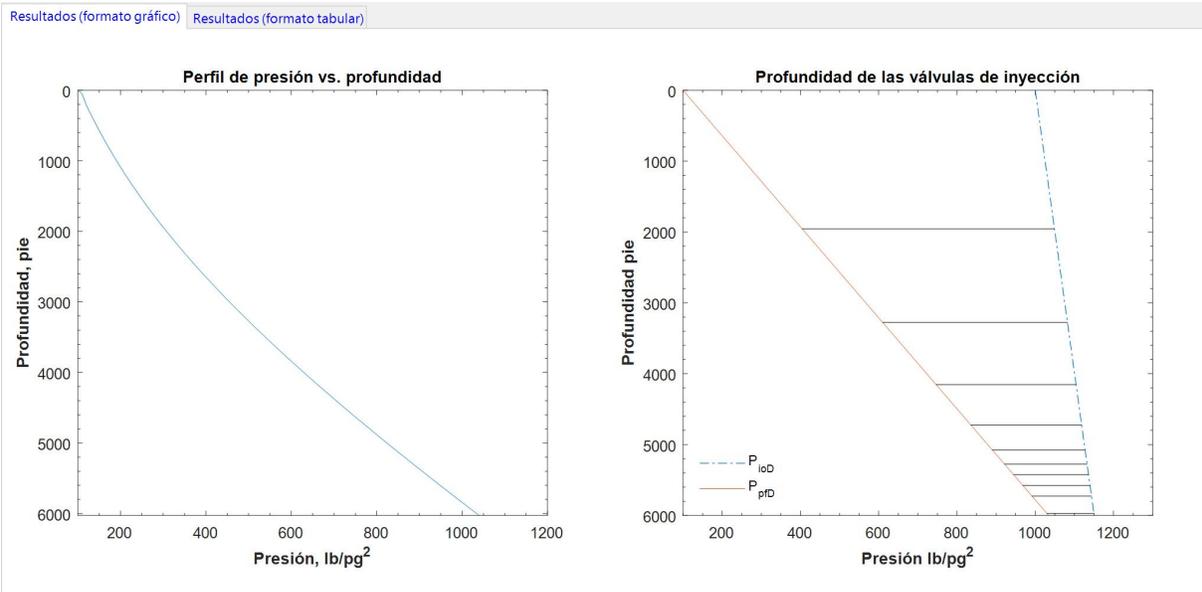
Se realizaron simulaciones para evaluar el efecto del diámetro de la tubería de producción (TP) sobre el perfil de la presión en el pozo y el número de válvulas de descarga. Para tal efecto, se consideraron valores 2.875 pg (caso base) y 3.5 pg. Los resultados obtenidos se presentan de forma gráfica en las **Figuras 6.10** y **6.11**, respectivamente. Es importante destacar que se determinó que el sistema no es operable con sartas de producción mayores a 3.5 pg para las condiciones de frontera establecidas en el estudio.

A partir de las **Figuras 6.10** y **6.11**, se observa que la presión en la TP aumenta y se requieren más válvulas de descarga con el incremento del diámetro de la sarta de 2.875 a 3.5 pg. En los escenarios analizados, esto se atribuye a que las velocidades de las fases se reducen y el colgamiento del líquido aumenta conforme al área transversal de la tubería aumenta; esto se refleja en el incremento de la caída de presión en la TP.

Como nota de atención, es importante mencionar que la reducción de la presión de fondo identificada en los casos analizados conforme disminuye el diámetro de la TP puede revertirse en algún momento debido a que el efecto de la fricción puede dominar sobre el efecto del colgamiento.



**Figura 6.10** Efecto de diámetro de TP de 2.875 pg.



**Figura 6.11** Efecto de diámetro de TP de 3.5 pg.

## 6.5 Presión de inyección y requerimientos de compresión

Como estudio complementario, se investigaron los requerimientos de presión de inyección y compresión para operar eficientemente un sistema de BNC de acuerdo al método de diseño del API descrito en el capítulo 3, a diferentes valores de corte de agua, presión en la cabeza del pozo, densidad relativa del gas de inyección y diámetro de la TP.

En la **Tabla 6.2**, se indican los resultados obtenidos variando el corte de agua. Se identificó que cuando el corte de agua aumenta, los requerimientos de compresión aumentan, debido a que se requiere de un mayor gasto del gas de inyección, una mayor presión del gas de inyección en la superficie, o bien o una combinación de ambas para generar una mayor caída de presión en el fondo del pozo.

Entrada de agua	Gasto del gas de inyección, MMpie <sup>3</sup> /d	Presión superficial del gas de inyección, psi	Requerimientos de compresión, HP
50%	0.8	1000	75
60%	1.0	1000	94
	1.2	1000	113
70%	1.0	1200	105
	1.2	1200	126

**Tabla 6.2** Requerimientos de compresión en función de la entrada de agua.

Por otra parte, los efectos de alta presión en la cabeza del pozo, pueden ser compensados incrementando la presión de inyección; observar que ello incrementa los requerimientos de compresión como se indica en la **Tabla 6.3**.

Presión en la cabeza del pozo, lb/pg <sup>2</sup>	Presión del gas de inyección, lb/pg <sup>2</sup>	Potencia de compresión, hp
100	1000	75
150	1100	79.7
200	1200	84.1

**Tabla 6.3** Requerimientos de compresión en función de presión en la cabeza del pozo.

Como se mencionó en secciones previas, un gas de inyección pesado genera una presión de fondo mayor que la generada por un gas ligero, sin embargo, un gas de inyección pesado requiere un gasto de inyección mayor y, por lo tanto, mayores requerimientos de compresión (**Tabla 6.4**)

Densidad del gas de inyección	Presión de inyección, lb/pg <sup>2</sup>	Gasto del gas de inyección, MMpie <sup>3</sup> /d	Potencia del compresor, hp
0.65	1000	0.8	75
0.8	900	1.1	96.5
0.9	800	1.4	115.5

**Tabla 6.4** Requerimientos de compresión en función de la densidad relativa del gas de inyección.

De acuerdo con las simulaciones realizadas, para que el sistema de BNC opere bajo las condiciones recomendadas en los métodos de diseño, se requiere incrementar el gasto del gas de inyección cuando se utiliza una TP de mayor diámetro; en consecuencia, los requerimientos de compresión serán mayores (**Tabla 6.5**)

Diámetro de TP, pg	Gasto del gas de inyección, MMpie <sup>3</sup> /d	Potencia del compresor, hp
2.875	0.8	75
3.5	1.1	99
4.5	2.4	216

**Tabla 6.5** Requerimientos de compresión en función del diámetro de la TP.

# Conclusiones y Recomendaciones

## Conclusiones

- Cuando la presión de un yacimiento no es suficiente para vencer las caídas de presión a lo largo de la sarta de producción, se puede implementar un sistema artificial de producción, SAP.
- El bombeo neumático es un SAP que consiste en la inyección de gas en la sarta de producción a cierta profundidad con la finalidad de reducir la carga hidrostática; de esta manera, la presión en la cara de la formación productora disminuye y el gasto de aceite que aporta el yacimiento se incrementa. Una de sus principales ventajas radica en su flexibilidad de operación, sobre todo en instalaciones costa afuera por cuestiones de espacio, así como en pozos verticales y horizontales.
- Los métodos de diseño de los sistemas de bombeo neumático, involucran modelos matemáticos complejos cuyo desarrollo y solución requiere de herramientas computacionales. Cuando no existe acceso disponible a software comercial para diseñarlos, o bien se requiere validar su funcionamiento, es conveniente desarrollar programas computacionales propios.
- En este contexto, en este trabajo primeramente se presentó una revisión de conceptos y consideraciones referentes a la operación y diseño de los sistemas de bombeo neumático continuo e intermitente. Asimismo, se describieron métodos de diseño utilizados en la práctica ingenieril para cada uno de ellos.
- Se desarrolló un programa computacional para automatizar cálculos relevantes para el diseño de los sistemas de bombeo neumático continuo e intermitente con base en los métodos descritos en el trabajo. Como entorno de programación se utilizó Matlab®. La herramienta cuenta con una interfaz gráfica de usuario para facilitar

tanto el ingreso de datos como la visualización de resultados. Los resultados se verificaron con datos reportados en literatura.

- Con base en la herramienta computacional desarrollada, se realizó un estudio paramétrico con variables selectas del sistema de BNC. Los principales resultados fueron:
  - a. La presión en el pozo se incrementa al aumentar el corte de agua y se requiere un número mayor de válvulas para alcanzar la máxima profundidad de inyección. Al aumentar el corte de agua será necesario incrementar el gasto del gas de inyección y/o incrementar la presión superficial del gas de inyección; en cualquier caso, los requerimientos de compresión se incrementan.
  - b. El espaciamiento entre las válvulas de descarga se reduce si aumenta la presión en la cabeza del pozo; como resultado, se incrementa el número de válvulas requeridas. Cuando existen altas presiones en el cabezal del pozo, se requerirá una mayor presión del gas de inyección para contrarrestar las caídas de presión en la sarta de producción.
  - c. La presión en el aparejo de producción disminuye y el espaciamiento de las válvulas de descarga aumenta (se requieren menos válvulas) con el incremento de la densidad relativa del gas de inyección. Al aumentar la densidad relativa del gas de inyección, los requerimientos de compresión se incrementan.
  - d. Con el incremento del diámetro de la TP, la presión en el pozo aumenta y se requieren más válvulas de descarga. En este escenario, debe incrementarse el gasto del gas de inyección y, en consecuencia, los requerimientos de compresión. Es importante mencionar que la reducción de la presión de fondo identificada conforme disminuye el diámetro de la TP puede revertirse en algún momento debido a que el efecto de la fricción puede dominar sobre el efecto del colgamiento

## Recomendaciones

- 1) Complementar el programa computacional con funcionalidades que incorporen modelos para calcular las caídas de presión en otros elementos del sistema integral de producción; por ejemplo, estranguladores, líneas de flujo, líneas de distribución del gas de inyección y compresores, así como con diferentes modelos de comportamiento de afluencia del yacimiento al pozo.
- 2) Continuar con la verificación de los resultados del programa computacional desarrollado, a partir de información de datos de campo.
- 3) Extender las funcionalidades del programa para su aplicación en pozos verticales profundos y pozos horizontales largos.

# Referencias

- 1) Baker, O. 1953. Designing Pipelines for Simultaneous Flow of Oil and Gas. Presentado en: Meeting of the Petroleum Branch of AIME, Dallas, Texas, Octubre. <https://doi.org/10.2118/323-G>
- 2) Beggs, H. D. 1984. *Gas Production Operations*. Oil & Gas Consultants International.
- 3) Beggs, H. D., Brill, J. P. 1973. An Experimental Study of Two-Phase in Inclined Pipes. *Journal of Petroleum Technology* **25** (05): 607-617. SPE-4007-PA. <https://doi.org/10.2118/4007-PA>
- 4) Beggs, H. D., Robinson, J. R. 1975. Estimating the Viscosity of Crude Oils Systems. *Journal of Petroleum Technology* **27** (09): 1140-1141. SPE-5434-PA. <https://doi.org/10.2118/5434-PA>
- 5) Blann, J. R. et al. 1994. *API Gas Lift Manual*. Book 6 of the Vocational Training Series, Third Edition, American Petroleum Institute, Exploration and Production Department.
- 6) Blann, J. R., Williams, J. D. 1984. Determining the Most Profitable Gas Injection Pressure for a Gas Lift Installation. *Journal of Petroleum Technology* **36** (4): 1305-1311. SPE-12202-PA. <https://doi.org/10.2118/1202-PA>
- 7) Colebrook, C. F. 1939. Turbulent Flow in Pipes, with Particular Reference to the Transition Region Between the Smooth and Rough Pipes Laws. *Journal of the Institution of Civil Engineers* **11**. 133-156. <https://doi.org/10.1680/ijoti.1939.13150>
- 8) Cook, H. L., Dotterweich, F. L. 1946. Report on Calibration of Positive Flow Beans Manufactured by Thornhill-Craver Company, Inc. Houston.
- 9) Decker, K. L. 1986. Computer Modeling of Gas-Lift Valve Performance. Presentado en: Offshore Technology Conference, Houston, Texas, Mayo. <https://doi.org/10.4043/5246-MS>
- 10) Dodson, C. R., Standing, M. B. 1944. Pressure-Volume-Temperature and Solubility Relations for Natural-Gas-Water-Mixtures. *Drilling and Production Practices*, API.

- 11) Dranchuk, P. M. et al. 1973. Computer Calculation of Natural Gas Compressibility Factors Using the Standing and Katz Correlation. Presentado en: Annual Technical Meeting, Edmonton, Canada, Mayo. <https://doi.org/10.2118/73-112>
- 12) Forero, G. et al. 1993. *Artificial Lift Manual Part 2A, Gas Lift Design Guide Management of Artificial Lift Systems*. Shell International Petroleum.
- 13) Glaso, O. 1980. Generalized Pressure-Volume-Temperature Correlations. Journal of Petroleum Technology **32**: 785-795. <https://doi.org/10.2118/8016-PA>
- 14) Hocott, C. R. 1939. Interfacial Tension Between Water and Oil Under Reservoir Conditions. Trans. **132**: 184-190. SPE-939184-G. <https://doi.org/10.2118/939184-G>
- 15) Hough, E. W., et al. 1951. Interfacial Tensions at Reservoir Pressures and Temperatures; Apparatus and the Water-Methane System. Journal Petroleum of Technology **3**: 57-60. <https://doi.org/10.2118/951057-G>
- 16) Katz, D. L. 1942. Prediction of Shrinkage of Crude Oils. Drilling and Prod. Prac. API.
- 17) Katz, D. L., et al. 1959. *Handbook of Natural Gas Engineering*. McGraw-Hill Book Co.
- 18) Kennedy, J. L. 1967. Here's What Affects HP Needs. Oil and Gas Journal **65**: 105.
- 19) Kirkpatrick, C. V. 1959. Advances in Gas Lift Technology. API-59-024, presentado en: Drilling and Production Practice, New York, New York, Enero.
- 20) Lasater, J. A. 1958. Bubble Point Pressure Correlation. Journal of Petroleum Technology **10**: 65-67. <https://doi.org/10.2118/957-G>
- 21) Lea, J. F. 2007. *Artificial Lift Selection*. Production Operations Engineering, Joe Dunn Clegg, Editor. SPE. <https://doi.org/10.2118/9781555631185-ch10>
- 22) Lee, A. L. et al. 1966. The Viscosity of Natural Gases. Journal of Petroleum Technology **18**: 997-1000. <https://doi.org/10.2118/1340-PA>
- 23) McCain, W. et al. 1988. The Coefficient of Isothermal Compressibility of Black Oils at Pressures Below the Bubblepoint. SPE Form. Eval **3**: 659-662. <https://doi.org/10.2118/15664-PA>
- 24) Mukherjee, H., Brill, J. P. 1983. Liquid Holdup Correlations for Inclined Two-Phase Flow. Journal of Petroleum Technology **35**: 1003-1008. <https://doi.org/10.2118/10923-PA>

- 25) Orkiszewski, J. 1967. Predicting Two-Phase Pressure Drops in Vertical Pipes. *Journal of Petroleum Technology* **19**: 829-838. <https://doi.org/10.2118/1546-PA>
- 26) RP 11V6.1999. Recommended Practice for Design of Continuous Flow Gas Lift Installations Using Injection Pressure Operated Valves. Second edition, American Petroleum Institute.
- 27) Schmidt, Z. 1998. Nozzle-Venturi Gas Lift Flow Control Device. U. S. Patent 5743717.
- 28) Shaw, S. F. 1949. Flow characteristics of gas lift in oil production. *Tex. Eng. Exp. St., Bull.*
- 29) Shiu, K. C., Beggs, H. D. 1980. Predicting Temperature in Flowing Wells. *J. Energy Resources* **102** (1): 2-11. <https://doi.org/10.1115/1.3227845>
- 30) Standing, M. B. 1947. A Pressure-Volume-Temperature Correlation for Mixtures of California Oil and Gases. *Drilling and Production Practices*, API.
- 31) Standing, M. B. 1977. *Volumetric and Phase Behavior of Oil Field Hydrocarbon Systems*. Society of Petroleum Engineers of AIME.
- 32) Standing, M. B. 1981. *Volumetric and Phase Behavior of Oil Field Hydrocarbon Systems*. Ninth ed. Society of Petroleum Engineers of AIME.
- 33) Vázquez, M., Beggs, M. D. 1980. Correlations for Fluid Physical Property Prediction. *Journal of Petroleum Technology* **32**: 968-970. <https://doi.org/10.2118/6719-PA>
- 34) Takács, G. 2005. *Gas Lift Manual*. PennWell Corporation.
- 35) White, G. W. et al. 1963. An analytical Concept of the Static and Dynamic Parameters of Intermittent Gas Lift. *Journal of Petroleum Technology* **15**: 301-308. <https://doi.org/10.2118/439-PA>
- 36) Winkler, H. W., Blann, J. R. 2007. *Gas Lift*. *Production Operations Engineering*, Joe Dunn Clegg, Editor. SPE. <https://doi.org/10.2118/9781555631185-ch12>
- 37) Winkler, H. W., Eads, P. T. 1989. Algorithm for More Accurately Predicting Nitrogen-Charged Gas-Lift Valve Operation at High Pressures and Temperatures. Presentado en: SPE Production Operations Symposium, Oklahoma City, Oklahoma, Marzo. <https://doi.org/10.2118/18871-MS>
- 38) Zimmerman, W. G. 1982. *Manual Básico de Gas Lift*. Informe interno de Lagoven, S. A. Tía Juana, Venezuela.

# Apéndices

## Apéndice A

### Gradiente de presión estático de gas de inyección

La presión del fondo del gas de inyección  $P_f$  a una profundidad dada se determina multiplicando la presión superficial del gas de inyección  $P_{io}$  por el llamado factor de presión del gas  $f_g$ .

Partiendo de la ecuación de estado para un gas real

$$P V = n R_u Z T, \quad (\text{A.1})$$

donde:

$$n = \frac{m}{M_{ap}} = \frac{m}{M_{air} \gamma_g}. \quad (\text{A.2})$$

Sustituyendo la **ecuación A.2** en la **ecuación A.1**, dividiendo ambos lados entre  $V$  y definiendo la constante del gas  $R_g = R_u/M_{ap}$ :

$$P = \frac{m}{V} \frac{R_u}{28.9 \gamma_g} Z T = \rho_g R_g Z T. \quad (\text{A.3})$$

Resolviendo la **ecuación A.3** para la densidad del gas  $\rho_g$ :

$$\rho_g = \frac{P}{R_g Z T}. \quad (\text{A.4})$$

Por otro lado, para un fluido en reposo donde la presión es función de la profundidad,  $P(h)$ , un cambio diferencial en la profundidad produce un cambio diferencial en la presión:

$$dP = \rho \left( \frac{g}{g_0} \right) dh. \quad (\text{A.5})$$

Sustituyendo la **ecuación A.4** en la **ecuación A.5**:

$$dP = \left( \frac{P}{R_g Z T} \right) \left( \frac{g}{g_0} \right) dh. \quad (\text{A.6})$$

En unidades de campo, la profundidad  $h$  es expresada en Mpie, por lo que la constante universal del gas se debe multiplicar por el factor apropiado, a fin de que la **ecuación A.6** sea dimensionalmente correcta

$$R_u = 1545.4 \frac{\text{lb}_f \cdot \text{ft}^3}{\text{ft}^2 \cdot \text{lb mol} \cdot ^\circ\text{R}} \cdot \frac{\text{Mft}}{1000 \text{ ft}} = 1.545 \frac{\text{lb}_f \cdot \text{ft}}{\text{lb} \cdot \text{mol} \cdot ^\circ\text{R}}. \quad (\text{A.7})$$

Sustituyendo la **ecuación A.7** en la **ecuación A.6**, después de separar variables e integrando desde la presión y profundidad de referencia,  $P_{io}$  y  $h = 0$ , respectivamente, hasta la presión y profundidad deseada,  $P_{ioD}$ ,  $h$ :

$$\int_{P_{io}}^{P_{ioD}} \frac{dP}{P} = \int_0^h \frac{dh}{R' Z T}. \quad (\text{A.8})$$

A continuación se resuelve la **ecuación A.8** para los 3 posibles casos.

## Caso 1 Temperatura variable y factor de compresibilidad fijo

En este caso la temperatura tiene una variación lineal de la forma:

$$T = a + b h. \quad (\text{A.9})$$

Donde  $a$  es una temperatura inicial de referencia,  $b$  el gradiente de temperatura, y  $h$  la profundidad de referencia.

Sea:

$$R' = R_g \left( \frac{g_0}{g} \right). \quad (\text{A.10})$$

Sustituyendo las **ecuaciones A.9** y **A.10** en la **ecuación A.8**:

$$\int_{P_{io}}^{P_{ioD}} \frac{dP}{P} = \frac{1}{R' Z} \int_0^h \frac{dh}{a + b h}. \quad (\text{A.11})$$

Resolviendo la **ecuación A.11**:

$$\ln \left| \frac{P_{ioD}}{P_{io}} \right| = \frac{1}{R' Z b} \ln |a + b h|, \quad (\text{A.12})$$

por lo que:

$$P_{ioD} = P_{io} \left( 1 + \frac{b h}{a} \right)^{\frac{1}{R' Z b}}. \quad (\text{A.13})$$

## Caso 2 Temperatura y factor de compresibilidad variables

En este caso el factor de compresibilidad puede ser aproximado como una función lineal de la forma:

$$Z = A_z + B_z h, \quad (\text{A.14})$$

donde:

$$\begin{aligned} A_z = & 1.0009 + (3.6059 - 8.3492 \gamma_g) \times 10^{-4} P_{io} \\ & + (2.0677 - 6.5555 \gamma_g - 6.0806 \gamma_g^2) \times 10^{-7} P_{io}^2, \end{aligned} \quad (\text{A.15})$$

$$\begin{aligned} B_z = & (3.4157 \gamma_g - 1.3882) \times 10^{-5} P_{io} \\ & + (2.5713 \gamma_g - 2.3486 \gamma_g^2 - 0.79398) \times 10^{-8} P_{io}^2. \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

Multiplicando la **ecuación A.14** por la **ecuación A.9**:

$$Z T = (A_z + B_z h) (a + b h) = a A_z + (a B_z + b A_z) h + b B_z h^2. \quad (\text{A.17})$$

Sean:

$$a A_z = A; \quad a B_z + b A_z = B; \quad b B_z = C. \quad (\text{A.18})$$

Sustituyendo los parámetros dados por las **ecuaciones A.18** en la **ecuación A.8** queda así:

$$\int_{P_{io}}^{P_{ioD}} \frac{dP}{p} = \frac{1}{C R'} \int_0^h \frac{dh}{h^2 + \frac{B}{C} h + \frac{A}{C}}, \quad (\text{A.19})$$

Resolviendo para  $h$  en el denominador de la integral del miembro derecho de la **ecuación A.19**:

$$h_{1,2} = \frac{1}{2} \left( -B \pm \sqrt{\frac{B^2}{C^2} - \frac{4A}{C}} \right), \quad (\text{A.20})$$

Si:

$$S = \sqrt{B^2 - 4AC}, \quad (\text{A.21})$$

factorizando el denominador de la integral del lado derecho de la **ecuación A.19**:

$$\int_{P_{io}}^{P_{ioD}} \frac{dp}{P} = \frac{1}{CR'} \int_0^h \frac{dh}{\left(h + \frac{B-S}{2C}\right) \left(h + \frac{B+S}{2C}\right)}, \quad (\text{A.22})$$

Separando en fracciones parciales el integrando del lado derecho de la **ecuación A.22**:

$$\frac{1}{CR'} \int_0^h \left( \frac{M}{h + \frac{B-S}{2C}} + \frac{N}{h + \frac{B+S}{2C}} \right) dh, \quad (\text{A.23})$$

Resolviendo los numeradores de las fracciones parciales resulta:

$$M = \frac{C}{S}; \quad N = -\frac{C}{S}. \quad (\text{A.24})$$

Por lo que la **ecuación A.23** queda así:

$$\frac{1}{R'S} \left( \int_0^h \frac{dh}{h + \frac{B-S}{2C}} - \int_0^h \frac{dh}{h + \frac{B+S}{2C}} \right), \quad (\text{A.25})$$

Antes de integrar la **ecuación A.25**, se multiplican sus denominadores por el conjugado respectivo del numerador del segundo término:

$$\frac{1}{R' S} \left( \int_0^h \frac{dh}{\left(h + \frac{B-S}{2C}\right) \left(\frac{B+S}{B+S}\right)} - \int_0^h \frac{dh}{\left(h + \frac{B+S}{2C}\right) \left(\frac{B-S}{B-S}\right)} \right),$$

Finalmente, la **ecuación A.25** queda:

$$\frac{1}{R' S} \left( \int_0^h \frac{2 C (B+S)}{2 C h (B+S) + B^2 - S^2} dh - \int_0^h \frac{2 C (B-S)}{2 C h (B-S) + B^2 - S^2} dh \right), \quad (\text{A.26})$$

Sean:

$$K_1 = 2 C (B + S); \quad K_2 = 2 C (B - S); \quad m_g = \frac{1}{R' S}, \quad (\text{A.27})$$

Sustituyendo las **ecuaciones A.27** en la **ecuación A.26**:

$$\int_{P_{io}}^{P_{ioD}} \frac{dP}{P} = m_g \left( \int_0^h \frac{K_1}{K_1 h + K_3} dh - \int_0^h \frac{K_2}{K_2 h + K_3} dh \right), \quad (\text{A.28})$$

De la **ecuación A.28**, se obtiene:

$$\ln \left| \frac{P_{ioD}}{P_{io}} \right| = m_g \ln \left| \frac{K_1 h + K_3}{K_2 h + K_3} \right|, \quad (\text{A.29})$$

Por lo tanto, la presión de fondo del gas de inyección está dada por:

$$P_{ioD} = P_{io} \left( \frac{K_1 h + K_3}{K_2 h + K_3} \right)^{m_g}, \quad (\text{A.30})$$

### Caso 3 Método iterativo con valores promedio de T y P

En este caso, la profundidad se mide en pies, por lo que la constante universal del gas queda con el mismo valor que en la **ecuación A.1** y la constante del gas queda así:

$$R_g = \frac{1545.4}{28.97 \gamma_g} = \frac{53.34}{\gamma_g} \frac{lb_f - pie}{lb - mol \text{ } ^\circ R}$$

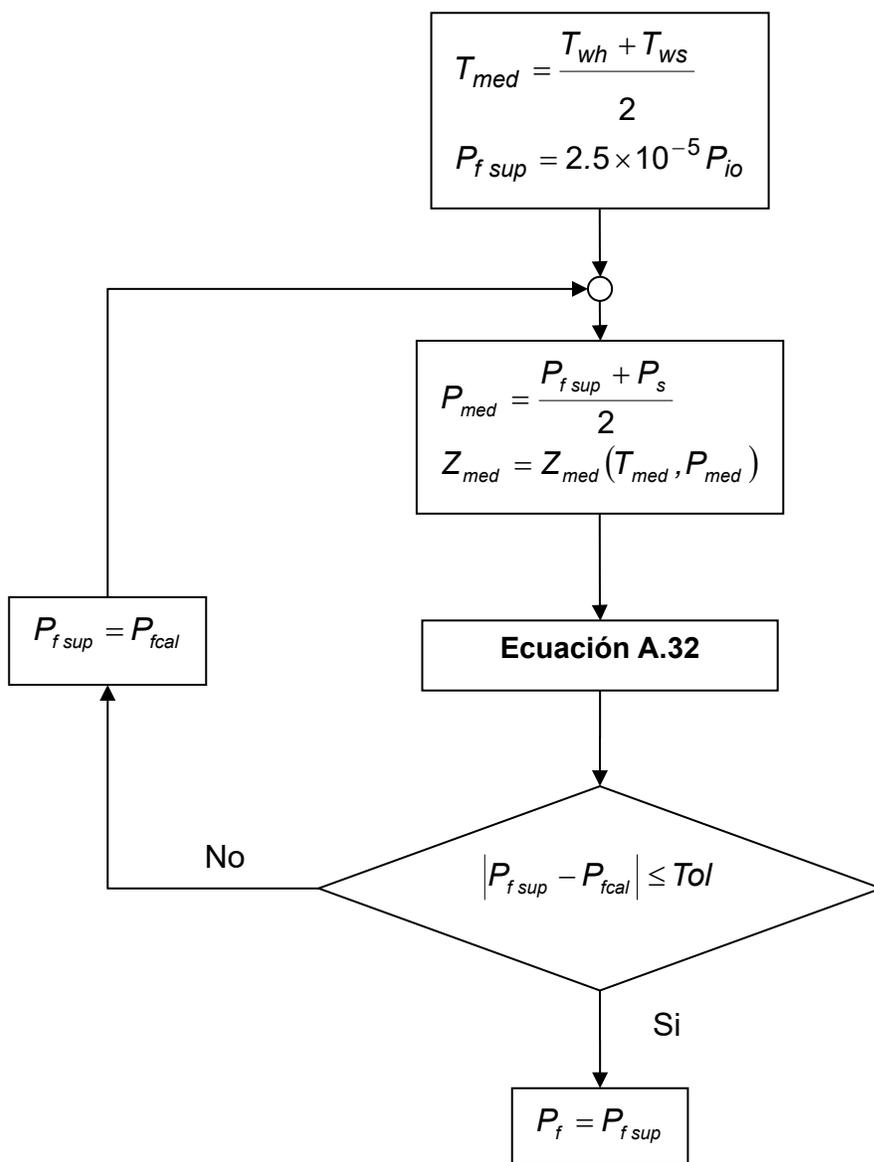
Se calcula una temperatura media entre la  $T_{wh}$  y la  $T_{ws}$ , se supone una presión basada en la presión de superficie y, dado que el factor de compresibilidad  $Z = Z(P, T)$ , también será un valor promedio.

Con estas suposiciones resolvemos la **ecuación A.8**:

$$\int_{P_{io}}^{P_{ioD}} \frac{dP}{P} = \frac{1}{\frac{53.34}{\gamma_g} Z_{med} (T_{med} + 460)} \cdot \frac{g}{g_0} \int_0^h dh \quad (A.31)$$

$$P_{ioD} = P_{io} e^{\frac{\gamma_g h}{53.34 (T_{med} + 460) Z_{med}}} \quad (A.32)$$

La **ecuación A.32** es sobre la que se debe iterar. A continuación se muestra un diagrama de flujo simple para ver la forma de solución.



**Figura A.1** Método iterativo para calcular la presión de fondo del gas de inyección.

## Apéndice B

### Modelo matemático simplificado para el comportamiento de válvulas de BN

El modelo aquí presentado (Decker,1986) está basado en ecuaciones de balance estático de fuerzas y describe cualitativamente el paso del gas a través de una válvula usando la ecuación de Thornhill-Craver (Cook y Dotterweich, 1946).

Para el desarrollo de este modelo se considera una válvula con asiento afilado, y la punta del vástago es una bola de carburo con un diámetro  $1/16$  de  $p_g$  mayor que el diámetro del puerto de la válvula.

El área equivalente de puerto es definida por el área lateral de un cono truncado circular recto. Se asume que el índice de carga de los fuelles  $B_{lr}$ , muestra un comportamiento lineal para que el desplazamiento requerido del vástago consiga un área equivalente de puerto dada y no hay incremento en la presión de los fuelles cargados de nitrógeno durante el desplazamiento del vástago.

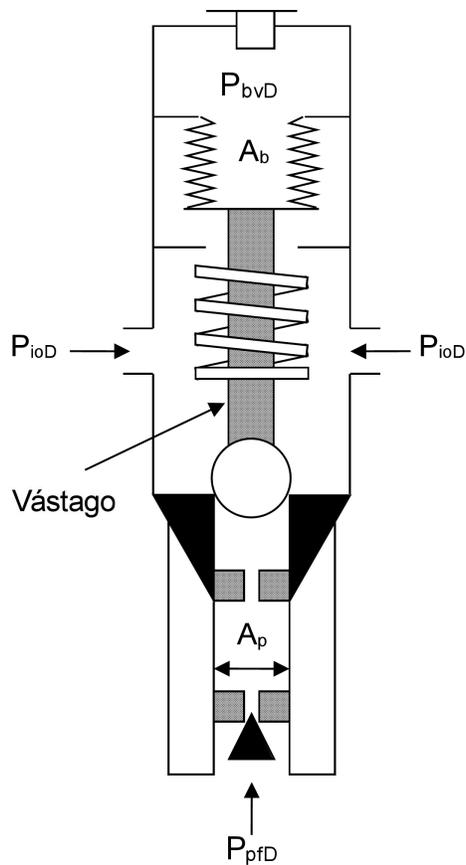
La restricción de flujo y las pérdidas de presión asociadas al montaje de una válvula check no son consideradas en los cálculos. En todos los cálculos se usa la misma gravedad específica del gas,  $g_g$ , relación de calores específicos,  $k$ , y coeficiente de descarga de la válvula  $C_d$ .

Cuando la válvula está parcialmente abierta, la presión del gas de inyección actúa sobre el área efectiva de los fuelles,  $A_b$  menos el área del puerto en el contacto bola/asiento,  $A_p$ . Sin importar la posición del vástago, la presión de los fluidos de producción,  $P_{pID}$ , se aplica sobre toda el área del contacto bola/asiento.

El procedimiento consta de 2 partes: cálculo del movimiento del vástago y, cálculo del área equivalente de puerto abierta al flujo de gas.

### B.1 Cálculo del desplazamiento del vástago

En la **Figura B.1** se muestran de forma esquemática, la bola, el vástago y el puerto de la válvula en posición cerrada.



**Figura B.1** Válvula tipo IPO en posición cerrada.

Tomando como referencia la **Figura B.1** y de acuerdo a la mecánica de válvulas, con las consideraciones hechas anteriormente, se tiene el siguiente balance de fuerzas

Suma de la fuerzas de apertura:

$$\sum F_o = P_{ioD} (A_b - A_p) + P_{pfD} A_p. \quad (B.1)$$

Suma de la fuerzas de cierre:

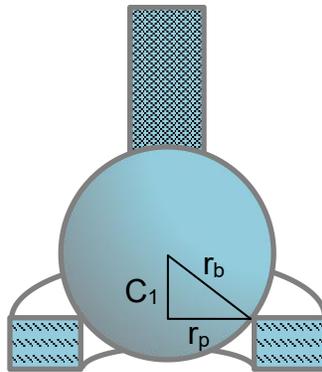
$$\sum F_c = P_{bvD} A_b + B_{lr} A_b M_{vs}. \quad (B.2)$$

Igualando las ecuaciones B.1 y B.2 y resolviendo para  $M_{vs}$ :

$$M_{vs} = \frac{P_{ioD} (A_b - A_p) + P_{pfD} A_p - P_{bvD} A_b}{B_{lr} A_b}. \quad (B.3)$$

## B.2 Cálculo del área equivalente de puerto abierto al flujo

La **Figura B.2** se toma como referencia en el cálculo del área equivalente de puerto.



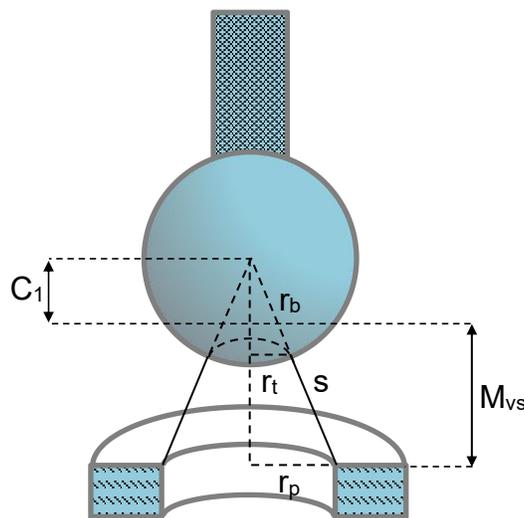
**Figura B.2** Válvula cerrada.

La **Figura B.2** muestra el vástago, la bola y el puerto de la válvula en posición cerrada. Formamos un triángulo rectángulo de forma tal que uno de sus vértices coincida con el centro de la bola, y el cateto opuesto a este vértice sea igual al radio de puerto, la

hipotenusa es el radio de la bola y la distancia del centro de la bola al contacto bola/asiento es:

$$C_1 = \sqrt{r_b^2 - r_p^2}. \quad (\text{B.4})$$

En la **Figura B.3** el contacto bola/asiento ya se ha desplazado verticalmente la misma distancia que el recorrido del vástago,  $M_{vs}$ , y la válvula está parcialmente abierta.



**Figura B.3** Válvula parcialmente abierta.

La hipotenusa del nuevo triángulo rectángulo así formado está dada por la suma del radio de la bola,  $r_b$  y el segmento de recta  $s$ , y el cateto opuesto es la suma de  $C_1$  y el desplazamiento del vástago  $M_{vs}$ .

Sea  $C_2$  la longitud de la hipotenusa:

$$C_2 = \sqrt{r_p^2 + (C_1 + M_{vs})^2}. \quad (\text{B.5})$$

Tomando coordenadas cartesianas de tal forma que, el cateto correspondiente al radio de puerto,  $r_p$ , sea paralelo al plano XY y perpendicular al eje de las cotas. Al hacer girar dicho triángulo en torno al eje Z se forma un cono circular recto cuya función paramétrica está dada por:

$$z(r, \theta) = \hat{i}x + \hat{j}y = \hat{i}r \cos \theta + \hat{j}r \sin \theta. \quad (\text{B.6})$$

Luego, haciendo uso del jacobiano de transformación para coordenadas cartesianas a cilíndricas, la superficie lateral del cono truncado circular recto,  $A_{pe}$ , es igual al área de un sector circular comprendido entre el radio  $r_b$  y el radio  $s+r_b$  y con un ángulo central medido en radianes de  $2\pi r_p / (s+r_b)$

$$A_{pe} = \int_0^{\frac{2\pi r_p}{s+r_b}} \int_{r_b}^{s+r_b} J\left(\frac{x, y}{r, \theta}\right) dr d\theta = \frac{\pi r_p (2r_b + s) s}{r_b + s}. \quad (\text{B.7})$$

De la **Figura B.3** por semejanza de triángulos tenemos que:

$$\frac{r_b}{r_t} = \frac{s}{r_p - r_t}, \quad (\text{B.8})$$

por lo que:

$$r_b = \frac{r_t s}{r_p - r_t}. \quad (\text{B.9})$$

Finalmente, sustituyendo la **ecuación B.9** en el lado derecho de la **ecuación B.7**, el área equivalente de puerto está dada por:

$$A_{pe} = \pi (r_t + r_p) s. \quad (\text{B.9})$$

De la misma **Figura B.3**, por semejanza de triángulos:

$$r_t = \frac{r_p r_b}{C_2}. \quad (\text{B.10})$$

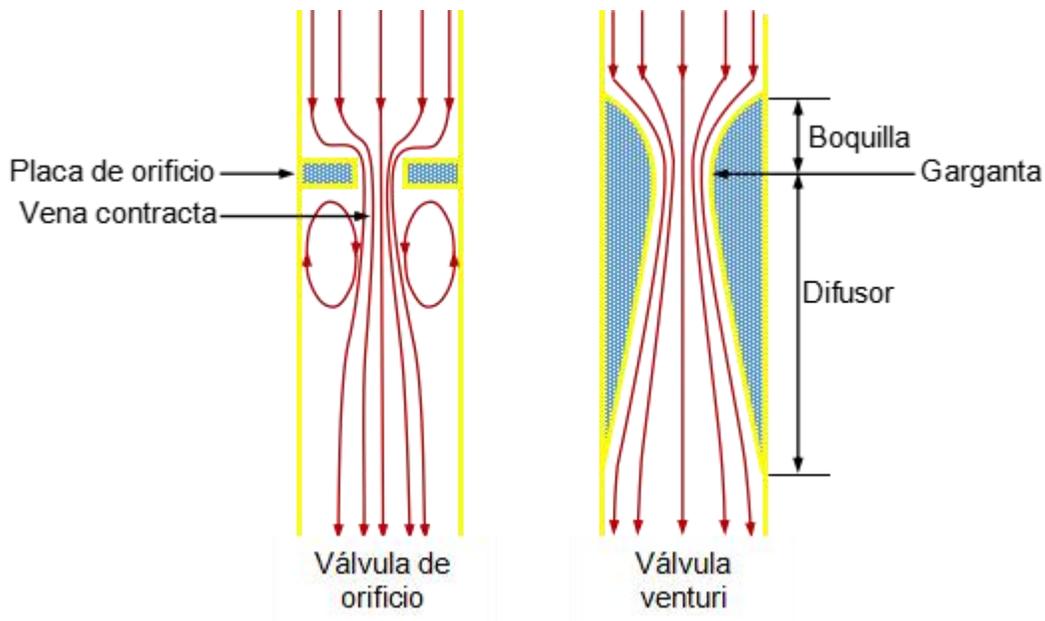
Y de la **ecuación B.5**:

$$s = C_2 - r_b. \quad (\text{B.11})$$

## Apéndice C

### Válvulas operantes

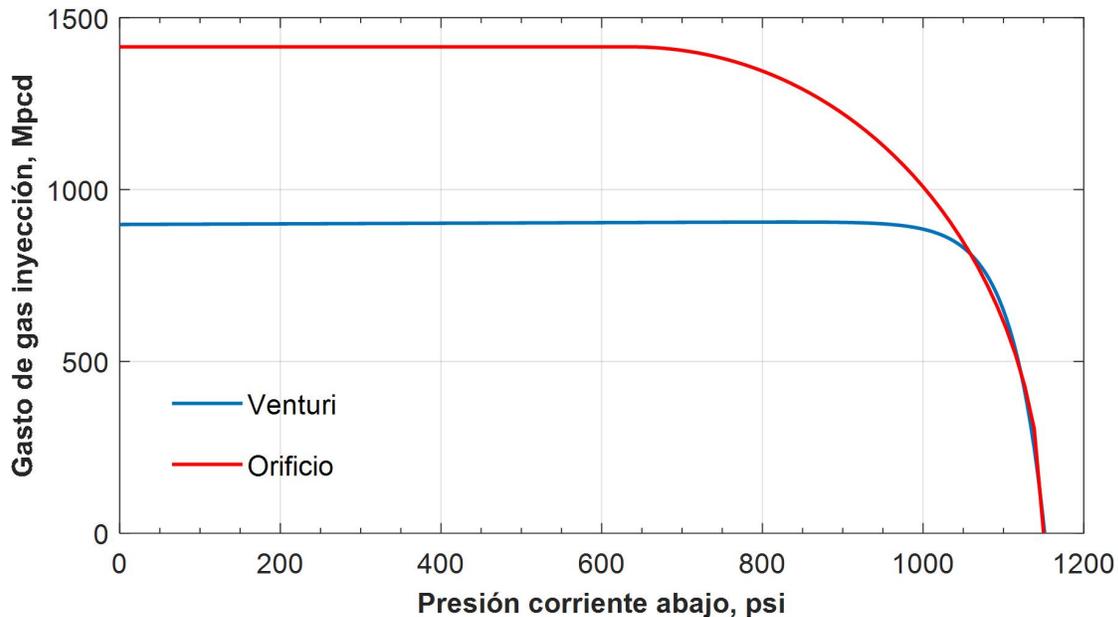
Existen dos tipos de válvulas operantes en instalaciones de BNC: válvula de orificio la cual consiste en una placa de orificio, y una válvula check de no retorno; el otro tipo es la válvula venturi inventada por Schmidt (1998), la cual difiere de la válvula de orificio, en que en lugar de tener un estrangulador fijo, el elemento de control de flujo es un dispositivo venturi convergente-divergente. La **Figura C.1** muestra ambos tipos de válvula.



**Figura C.1** Válvulas operantes.

Como puede verse en la **Figura C.1**, en la válvula de orificio se forman vórtices corriente abajo del estrangulador debido a una súbita expansión del gas, lo cual reduce el área de flujo, esto se conoce como *vena contracta*. Por otro lado, en la válvula venturi, la menor área de flujo es la garganta en sí misma.

La principal ventaja de una válvula venturi sobre una válvula de orificio es que, la relación de propiedades críticas,  $H$ , en una válvula venturi es del 0.85 a 0.9, mientras que en una válvula de orificio es de 0.55 a 0.6, lo que se refleja en su comportamiento dinámico como se muestra en la **Figura C.2**:



**Figura C.2** Comportamiento dinámico de válvulas operantes tipo orificio y tipo venturi.

Como puede verse en la **Figura C.2**, bajo las mismas condiciones de flujo corriente arriba, la caída de presión a través de la válvula venturi para lograr la condición de flujo crítico es menor que en una válvula de orificio y, dado que la caída de presión en una válvula operante debe ser menor que 200 lb/pg<sup>2</sup>, la válvula de orificio trabajará la mayor parte del tiempo en condiciones de flujo subcrítico.

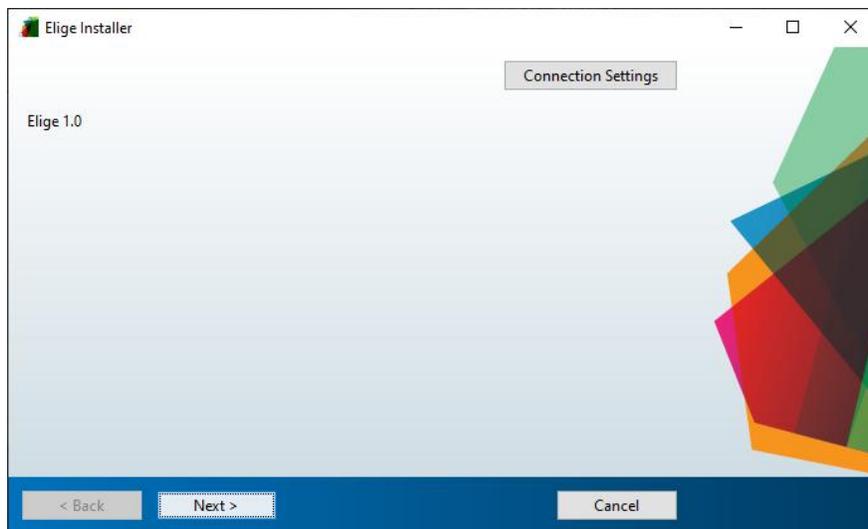
Toda vez que la presión de los fluidos en la TP siempre tiene fluctuaciones, el gasto de gas a través de la válvula cambiará en respuesta a dicha fluctuaciones. Pero este comportamiento es contrario al principio de operación del BNC en el que se requiere mantener la presión de los fluidos producción constante, para evitar problemas de cabeceo tanto en la TP como en el espacio anular.

Por lo anterior, se recomienda el uso de válvulas venturi, particularmente en instalaciones de BNC con punto de inyección único. Además, el dispositivo check de la válvula venturi ha mostrado ser más resistente que el de la válvula de orificio, lo cual reduce los costos en intervenciones principalmente en instalaciones costa afuera y/o con altos gastos de inyección de gas.

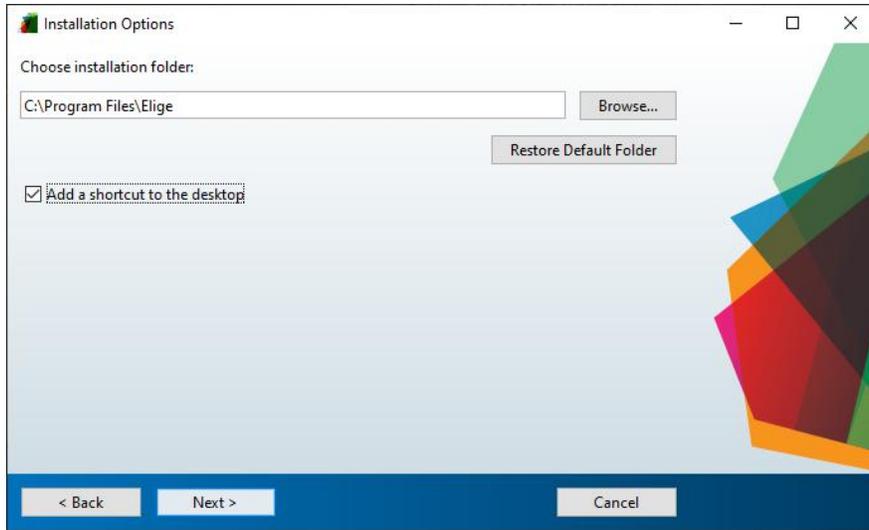
## Apéndice D

### Instalación del programa

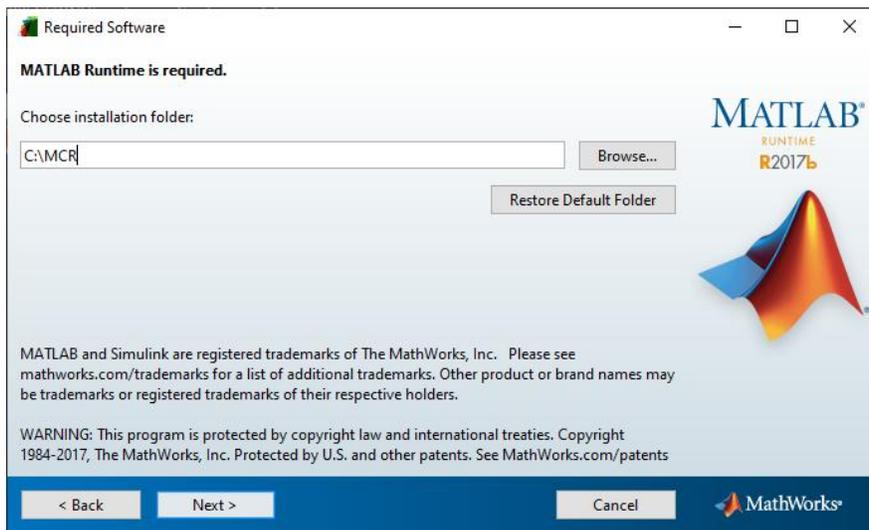
Para poder ejecutar el programa desarrollado en este trabajo, en una computadora que no tenga instalado Matlab® se ejecuta el archivo *MyAppInstaller\_mcr.exe*, y se siguen instrucciones en pantalla como se muestra en las **Figuras D.1** a **D.5.**:



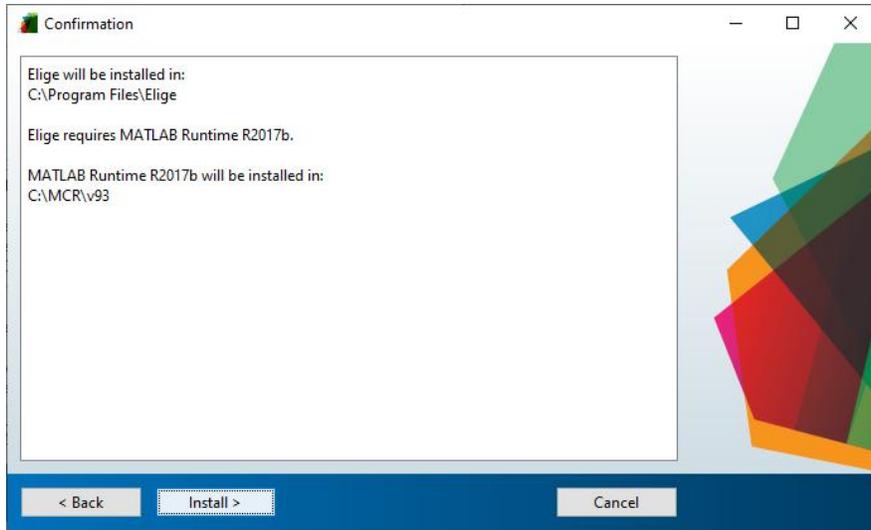
**Figura D.1** Instalador del programa.



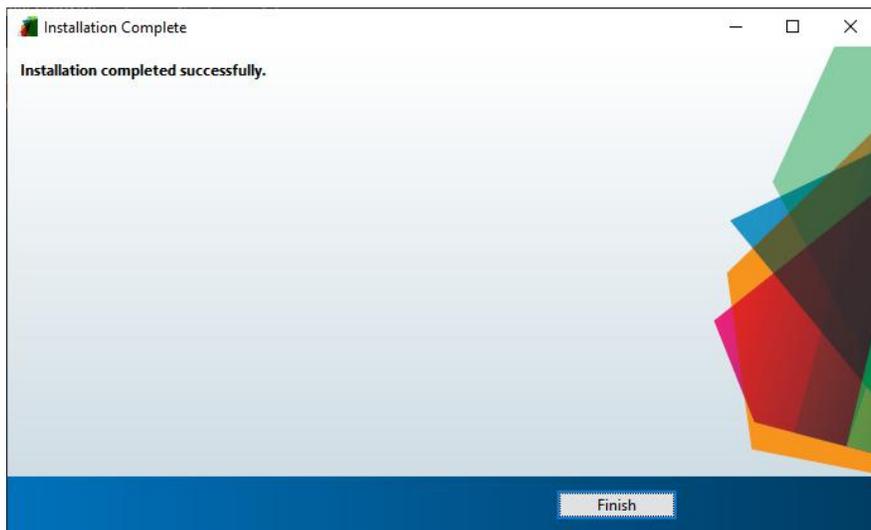
**Figura D.2** Carpeta destino del programa y opción de acceso directo en escritorio.



**Figura D.3** Elección de carpeta destino del Matlab Runtime.



**Figura D.4** Verificación previa a la instalación del programa.



**Figura D.5** Instalación exitosa.