



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis reológico de una válvula
balanceada para generar Bombeo
Neumático en una tubería de producción
diseñada en el laboratorio de mecánica de
la FI de la UNAM**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Petrolero

P R E S E N T A

Katya Icxel Lazcano García

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Arnulfo Ortíz Gómez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

“Quisiera dedicaros unos versos
Que valieran lo que vale vuestra luz
Pero no cabe en un folio el universo
Tampoco en una frase cabe mi gratitud

Han de saber que decidí no decir nombres
Por si alguno se quedaba en el tintero
Así que va por las mujeres y los hombres
Por todos aquellos que me quieren y que quiero”

A mis padres, “por ser las columnas de mi templo
Por enseñarme con su amor y con su ejemplo...”

“A mis hermanos, por ser calor y abrigo
Aconsejarme cuando busco un buen amigo
Por perdonarme cuando no sé lo que digo
Y por estar siempre conmigo
Como el sol está en el trigo
Y va por ti, y por las piedras del camino
Y por la suerte y el regalo de tener a mis sobrinos
A mi lado, deshojando los segundos
Con ellos y mi credo ya no me da miedo el mundo

Especial dedicación pa' los amigos
Que me dan su corazón sin regateos
Que no saben de mi flow ni mis rapeos
Pero solo con mirarme saben de qué pie cojeo
Y Dios bendiga los clavos de mi ataúd”
Y a los profesores “que se dejan la piel y la juventud
En cada texto, respetando la escritura”
maestros “honestos dan amor a esta cultura

Y yo solo canto lo que el corazón exige
Como el loco rruiseñor que no escapa del terremoto
Al hada noble del amor que no se elige
Ya os lo dije: yo no valgo nada sin vosotros.”

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
ANTECEDENTES	4
I.1 Historia del Gas Lift	8
I.2 Inicios del levantamiento artificial con aire	8
I.3 Transición del levantamiento artificial con aire al gas lift	10
I.4 Inicios del bombeo electrosumergible	11
I.5 Historia del bombeo hidráulico	11
I.6 Bombeo tipo jet	13
I. 7 Bombeo de cavidades progresivas	15
CAPÍTULO II	
CLASIFICACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE VÁLVULAS PARA BOMBEO NEUMÁTICO.....	
II. 1 Mecanismos de las válvulas de bombeo neumático	20
II. 2 Tipos de válvulas de bombeo neumático	25
II.2.1. Válvulas Balanceadas.....	25
II.2.2. Válvulas Desbalanceadas.....	25
II.3 Clasificación de las válvulas de Bombeo Neumático de acuerdo con el tipo de flujo.....	27
II.3.1. Válvulas para flujo continuo.....	27
II.3.2. Válvulas para flujo intermitente.....	28
CAPÍTULO III	
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA VÁLVULA PARA BN.....	34

III.1 Desarrollo de las Válvulas en el tiempo	34
III.2 Tipos de Bombeo Neumático	35
III.2.1 Bombeo Neumático Continuo BNC.....	37
III.2.2 Bombeo Neumático Intermitente BNI.....	37
III.3. Diseño de la Válvula Balanceada (VB).....	39
III.4. Diseño de válvula propuesta.....	41
CAPÍTULO IV	
ANÁLISIS REOLÓGICO DE UNA VÁLVULA PARA BN.....	44
IV.1 Introducción	44
IV.2 Flujo de fluidos en un Sistema Integral de Producción (SIP)	45
IV.3 Análisis de fuerzas en equilibrio	48
IV.4 Análisis de fuerzas del diseño de válvula propuesto.....	54
CAPÍTULO V	
MODELO EXPERIMENTAL.....	56
V.1 Análisis dimensional.....	56
V.1.1. Teorema π de Buckingham.....	57
V.1.2. Similitud.....	57
V.1.3. Números adimensionales.....	58
V.1.4. Leyes de semejanza.....	60
V.2 Proceso experimental.....	60
V.3 Análisis dimensional del modelo experimental.....	63
V.4 Descripción del modelo experimental	67
V.5 Trabajo experimental.....	69

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS DE RESULTADOS	78
VI.1 Cálculo del gradiente de presión (con resbalamiento)	90
VI.1 La constante de deformación del resorte (polietileno).	91
VI.2 El avance del centro de masa de la burbuja en su ascenso.	92
VI.3 El Gasto producido con respecto a la presión de inyección.	93
VI.4 La inyección de gas con respeto al Gasto de producción.	94
VI.5 Presión de apertura	95

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES	96
REFERENCIAS	98

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Pozo en operación-bombeo-usando la estructura del aparejo de producción actualmente conocida	6
Figura 1.2 Diseño patentado por Thomas B. Gunning relacionado con el dispositivo Aire-lift 1864.....	9
Figura 1.3 Bomba insertada en la tubería de producción.	13
Figura 1.4 a) Bomba Kobe tipo A de tipo chorro, b) Bomba Kobe tipo B de T.R.....	14
Figura 1.5 Bombas de cavidades progresivas.....	15
Figura 1.6 Esquema de Instalaciones de Bombeo Neumático.....	17
Figura 2.1 Partes fundamentales de una válvula.	20
Figura 2.2 Fuelle de una válvula para inyección de gas	22
Figura 2.3 Clasificación de las válvulas de Bombeo Neumático	24
Figura 2.4 Válvula balanceada	25

Figura 2.5	Instalación de BN para flujo continuo en tres etapas.	28
Figura 2.6	Bombeo Neumático Intermitente en tres etapas.	29
Figura 2.7	Válvula Diferencial en un Pozo lista para abrir.	30
Figura 2.8	a) Detalle de una Válvula Operada por Fluido, b) Aparejo de BN. Válvula operada por fluido.	31
Figura 2.9	a) Aparejo de BN de una válvula Operada por Presión, b) Detalles de una Válvula Operada por Presión.	32
Figura 3.1	Esquema de la primera patente registrada de una válvula para generar Bombeo Neumático (BN) dentro de una tubería de producción (A. Brear); el gas es pasado por una aguja de inyección que conecta con la región anular entre las tuberías de revestimiento (TR) y la de producción (TP) y descarga el gas en la parte baja de la tubería de producción.	35
Figura 3.2	Tipos de flujo en una tubería.	38
Figura 3.3	Esquema de una válvula para el inflado de neumáticos y el gusanillo que se rosca dentro de la válvula, el cilindro de látex es el que impide el contra flujo de gas a través de los orificios de inyección.	40
Figura 3.4	Esquema de la válvula para la generación de Bombeo Neumático (BN). ...	43
Figura 4.1	Representación de nodos principales que componen un Sistema Integral de Producción (SIP).	45
Figura 4.2	Esquema con las componentes fundamentales de una válvula.	49
Figura 4.3	Válvula balanceada en las posiciones de apertura y cierre. Las áreas correspondientes a cada una de las presiones señaladas son iguales.	52
Figura 4.4	Dibujo del diseño de válvula para generar BN propuesto.	54
Figura 5.1	Modelo experimental de una instalación de Bombeo Neumático.	62
Figura 5.2	Ilustración de las partes del modelo experimental que van colocados dentro del recipiente de acrílico.	67
Figura 5.3	Posicionamiento de la válvula diseñada.	68

Figura 5.4	Formación y desarrollo del Flujo tipo bache a .25 [Kg/cm ²].	70
Figura 5.5	Fotografía del flujo bache a .5 [kg/cm ²].	72
Figura 5.6	Fotografía de los flujos bache y anular a 1 [kg/cm ²].	74
Figura 5.7	Fotografía del flujo de transición y flujo bache a 1.5 [kg/cm ²].	75
Figura 5.8	Fotografía del flujo de transición y flujo bache a 2 [kg/cm ²].	76
Figura 5.9	Fotografía del flujo de transición y flujo bache a 3.6 [kg/cm ²].	77
Figura 6.1	Gráfica que representa la caída de presión en la tubería con respecto a cada prueba de presión.	90
Figura 6.2	Gráfica que representa la deformación del polietileno.	91
Figura 6.3	Fotografías que ilustran que el centro de masa avanza de manera proporcional durante su ascenso.	92
Figura 6.4	Gráfico que ilustra la tendencia de la presión de inyección con respecto al gasto producido.	93
Figura 6.5	Gráfico que ilustra la tendencia del gasto de aire y glicerina con respecto a la presión de inyección.	94
Figura 6.6	Fuerzas de apertura y cierre de una válvula convencional.	95
Figura 6.7	Fuerzas de apertura y cierre del diseño propuesto de la válvula.	95

INDICE DE TABLAS

Tabla 5.1	Datos obtenidos del primer experimento a .25 [Kg/cm ²].	72
Tabla 5.2	Datos obtenidos del segundo experimento a .5 [Kg/cm ²].	73
Tabla 5.3	Datos obtenidos del tercer experimento a 1 [Kg/cm ²].	74
Tabla 5.4	Datos obtenidos del cuarto experimento a 1.5 [Kg/cm ²].	75
Tabla 5.5	Datos obtenidos del cuarto experimento a 2 [Kg/cm ²].	76

Tabla 5.6	Datos obtenidos del cuarto experimento a 3.6 [Kg/cm ²]	77
Tabla 6.1	Propiedades de las fases líquida y gaseosa obtenidas de los experimentos.	78
Tabla 6.2	Fracción volumétrica.....	80
Tabla 6.3	Número de Froud y Velocidad de la mezcla	80
Tabla 6.4	Cálculo de las "L", Fracción volumétrica, Número de Froud.....	82
Tabla 6.5	Coefficientes para cada patrón de flujo.	83
Tabla 6.6	Colgamiento del líquido para cada prueba de presión.	83
Tabla 6.7	Relación de solubilidad para cada prueba de presión.	84
Tabla 6.8	Factor de volumen para cada prueba de presión	85
Tabla 6.9	Densidad del aire y la glicerina para cada prueba de presión a condiciones de flujo.....	85
Tabla 6.10	Valores de NVL para cada prueba de presión.....	86
Tabla 6.11	Coefficientes del patrón de flujo.	87
Tabla 6.12	Cálculo de "C" para cada valor de presión. para cada prueba de presión.....	87
Tabla 6.13	Colgamiento del líquido corregido para cada prueba de presión.	88
Tabla 6.14	Coefficientes calculados para estimar el gradiente de presión.	89
Tabla 6.15	Gradiente de presión	90
Tabla 6.16	Gráfica que representa la deformación del polietileno.....	91
Tabla 6.17	Presión de inyección con respecto al gasto producido.....	93
Tabla 6.18	Presión de inyección con respecto al gasto producido.....	94

INTRODUCCIÓN

En este trabajo el objetivo es proponer un diseño alternativo de válvula balanceada para inyección de gas en un sistema de Bombeo Neumático, así como su fabricación y la construcción de un modelo a escala que nos permita poner a prueba su funcionamiento.

El desarrollo de este trabajo tiene el objetivo también de ser un documento de consulta para los estudiantes de la carrera de Ingeniería Petrolera, ya que la mayor parte de la bibliografía consultada no está disponible en la biblioteca de la Facultad de Ingeniería; esta se consiguió en distintas exposiciones, ferias de libros y bibliotecas personales de varios amigos profesores.

El prototipo que elaboramos fue probado en un modelo elaborado con tuberías de acrílico de distintos diámetros simulando una tubería de producción en donde se pudo observar los distintos tipos de flujo que se presentan en el sistema.

La válvula que estamos proponiendo consiste en un sistema de inyección de aire en una sola dirección, este control se logra mediante un látex al cual se le determinaron sus propiedades físicas y mecánicas de deformación considerándolo como un cuerpo elástico (Ley de Hooke)

Para comprender este diseño, en el Capítulo I hacemos un recorrido por la historia del arte de la industria petrolera desde una visión macroscópica como lo son los equipos superficiales requeridos en este sistema artificial de producción, y cómo funcionan, así como una vista microscópica que engloba a los equipos que van introducidos al subsuelo fundamentales para la producción de hidrocarburos. En esta investigación logramos recopilar algunos nombres de los inventores que lograron registrar sus patentes, proponiendo nuevos materiales para la fabricación de herramientas para los diferentes sistemas artificiales de producción y nuevos conocimientos, por mencionar algunos; la composición del aire y la ley de Hooke.

Un accesorio fundamental para la aplicación del Bombeo Neumático son las válvulas para la inyección de gas, por lo que, en el Capítulo II se describen el conjunto de elementos o

las partes internas que integran a la válvula en su conjunto. Hablamos también de la variabilidad de tipos que existen en el mercado, las fuerzas que intervienen en la apertura y cierre de estas mismas; y cómo los primeros investigadores lograron obtener las patentes correspondientes a sus diseños propuestos.

En el desarrollo del Capítulo III, hacemos una descripción de los tipos de bombeo neumático que se utilizan en la Industria Petrolera para inyectar energía al yacimiento y continuar con una producción una vez que el yacimiento ha sido despresurizado; Se describe en que consiste el bombeo Continuo, bombeo Intermitente y una descripción de los tipos de flujo que se pueden presentar en una tubería vertical de producción.

Cabe mencionar que durante nuestras observaciones en el prototipo desarrollado en el laboratorio y en los experimentos fue posible realizar una comparación y establecer conclusiones entre la teoría estudiada y los resultados obtenidos y con este conocimiento la concordancia que se presenta en la réplica de nuestro modelo a escala de una instalación de Bombeo Neumático.

La investigación del Dr. Arnulfo Ortíz Gómez sobre la fabricación de burbujas en medios confinados es un tema que inspira este diseño; por tal motivo, en el capítulo IV, se presenta la reología correspondiente a la propuesta de una válvula balanceada, las partes que la componen y las ecuaciones que modelan las fuerzas que intervienen en su funcionamiento.

En el capítulo V, una vez establecidas las bases, pasamos a la fase del Modelo Experimental, donde se describe a detalle los materiales que seleccionamos, los pasos que seguimos para construirlo y montaje en el laboratorio de Mecánica de Fluidos de la FI, y finalmente el accionamiento de la válvula a través de la inyección de aire a diferentes presiones.

La observación de los tipos de flujo y la recopilación de las propiedades para la fase líquida y gaseosa que se presentan durante la fase experimental, así como observar cuál es el rango de presiones que garantizan la salida de flujo en la parte superior del sistema, la invasión de fluido al espacio anular, son los objetivos que nos fijamos al principio en este trabajo y que tocamos en este capítulo V.

Por último, en el capítulo VI, se presenta un conjunto de gráficas y tablas relacionadas con las mediciones obtenidas en la fase experimental, medimos la caída de presión dentro de la tubería mediante el método de la correlación de Beggs & Brill.

Los puntos clave que nos ayudaron a establecer las conclusiones fueron los siguientes: Como se mencionó antes la caída de presión dentro de la tubería juega un rol importante en nuestras mediciones, la calibración del modelo experimental mediante el seguimiento del crecimiento de una burbuja hasta alcanzar su volumen máximo, la instalación de un manómetro de presión en la línea de inyección de aire, la constante de deformación del resorte, el avance del centro de masa de la burbuja en su trayectoria ascendente, el gasto de líquido obtenido para cada prueba de inyección de aire; son las variables que consideramos en el análisis dimensional.

Mediante las gráficas del gradiente de presión, el gasto inyectado de gas, el gasto obtenido de glicerina, etc. Pudimos establecer las conclusiones relacionadas con la operación de la válvula en el dispositivo experimental y una comparación con las válvulas comerciales de la presión mínima requerida que se necesita para la apertura y cierre.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

En la vida productiva de un pozo petrolero, la presión en el interior del pozo capaz de sustentar la producción de manera natural, con el paso del tiempo esta presión se reduce a niveles tan bajos que el pozo deja de aportar fluidos o bien no logra mantener una producción rentable. Teniendo en cuenta esta situación, pueden quedar atrás volúmenes significativos de petróleo. Para recuperar el petróleo remanente y mejorar la productividad del yacimiento, es posible implementar diversas soluciones de levantamiento artificial, que implican el bombeo del petróleo a la superficie o la modificación de las propiedades del fluido del pozo, lo que permite dotar de la energía necesaria al yacimiento para llevar los fluidos hacia la superficie.

Los sistemas artificiales de producción, que consta de una infraestructura adicional al pozo y que asisten con la energía necesaria para incrementar o mantener los gastos de producción. Existe una gran variedad de Sistemas Artificiales de Producción (SAP), para su selección y diseño dependerá de diversos factores, como las condiciones de operación, el diseño del pozo o pozos a los que se les instalará, la caracterización del yacimiento; El aspecto económico también juega un papel importante.

La historia de los sistemas artificiales inicia el 27 de agosto de 1859, cerca de Titusville, Pennsylvania, USA, con el coronel Edwin Laurentine Drake quien encontró hidrocarburos en la superficie y decidió perforar el pozo para producirlo. Esto marcó el inicio de la era petrolera, no sólo por el descubrimiento del petróleo si no por el diseño del aparejo de producción y las herramientas utilizadas en la perforación que Drake y su tío, Billy Smith un experto en pozos de agua salada y herrero, solían aplicar técnicas idénticas que se habían desarrollado en la industria de pozos de agua, pero ahora para aplicarlas en la perforación y extracción de pozos petroleros [1].

La mayor influencia al inicio en el equipo de producción utilizado por la industria petrolera fue el resultado de las herramientas de cable utilizadas para perforar los pozos: La viga

oscilante, que de una manera simple y efectiva levanta y deja caer la sarta, también fue adecuada para operar en el orificio inferior del émbolo de la bomba en el fondo del pozo. En cuanto a las cargas de perforación y las de bombeo en un principio eran pequeñas como para permitir que la estructura de la torre fuera de madera con algunas piezas de hierro en los puntos de apoyo, lo cual resultaba efectiva y al mismo tiempo económicamente rentable. Cabe destacar que los avances en las actividades de perforación y producción, se basan el uso de la tubería de revestimiento. El primer pozo con tubería de revestimiento se realizó en el año 1861.

Otro aporte significativo en los sistemas artificiales fue la aplicación de una varilla de bombeo que puede elevarse, combinando el bombeo con una barra móvil y varillas de bombeo se extiende al menos hasta el año 476 a. C. en Egipto, junto con bombas de doble efecto, hechas de plomo fundido, con émbolos hechos de madera y cuero, mientras que las varillas fueron hechas de madera.

En 1886 se tienen registros de una instalación con varillas de bombeo en la cual el barril de la bomba se colocaba en el fondo del pozo en el extremo de la tubería junto con una pieza que se conocía como ancla que iba colocada en el extremo inferior del barril.

A la bomba mecánica se le adjuntaba el número requerido de varillas de madera, atornilladas entre sí, mientras que el extremo superior de la sarta de varillas que se conecta con en balancín, en la parte inferior del barril de la bomba y de la varilla se colocaba una válvula. La varilla de succión estaba provista de tres o cuatro empaques de cuero, que hacían presión contra el barril de trabajo por el peso de la columna de aceite.

En la Figura 1.1. Se presenta una imagen con la estructura del aparejo de producción; La torre de madera y los depósitos para el almacenamiento del aceite.

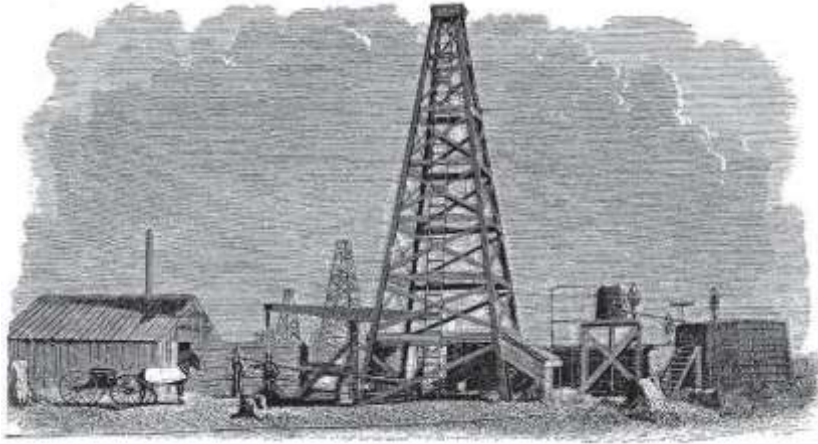


Figura 1.1 Pozo en operación-bombeo-usando la estructura del aparejo de producción actualmente conocida [1].

Desde el año de 1859, las varillas de succión que eran hechas de madera fueron reemplazadas por varillas de acero a finales del siglo XIX, las varillas hechas de fibra de carbono hicieron su aparición a principios del siglo XX. A medida que se perforaban los pozos cada vez más profundos, las capacidades del bombeo también aumentaban por lo que el peso de la sarta de varillas hechas de acero o hierro representaron un gran problema que se reconoció en el año de 1917. Para corregir el problema del peso, las varillas comenzaron a hacerse tubulares y huecas.

El sistema rotativo comenzó a desarrollarse y usarse durante las últimas tres décadas del siglo XIX, para perforar pozos de agua y pozos de petróleo de poca profundidad en lugares donde la perforación con Sistemas de Cable no podía ser utilizadas de manera eficiente. El uso aumentó con la perforación del primer pozo *Sindletop* cerca de Beaumont, Texas en el año de 1901. Entre 1915 y comenzaron a realizarse los cambios sobre el sistema rotativo, sin embargo, el sistema de percusión con cable y el frente de la plataforma mantuvieron su dominio durante ese período a pesar de que los pozos se iban haciendo más profundos. A medida que incrementaba la profundidad, debido a la gran longitud de la varilla de bombeo requerida, se encontraban varias dificultades, tales como, el estiramiento de la varilla en cada golpe, la separación de la varilla, el desgaste excesivo de la varilla al frotarse contra la carcasa, el peso de las piezas y el pandeo de la varilla. Estos factores disminuyen la eficiencia y la rotura de las piezas [2].

Bomba de engranes

Para el año de 1932, con la evolución y eficiencia de la bomba con engranajes reductores de la velocidad del motor, que a su vez permitió la introducción de un motor multicilíndrico, y con el desarrollo de unidades móviles de mantenimiento de pozo que eliminaron la necesidad de suministrar potencia y elevación en cada pozo; El aparejo de perforación estándar de esa época había dado paso a las unidades de bombeo de balancín.

La introducción del dinamómetro para entender la dinámica del sistema de bombeo de varilla, colocándolo en la bomba de fondo del pozo: mostró de manera concluyente que la pérdida de desplazamiento en los pozos de profundidad aproximada a los 5,000 pies generalmente no se debe a la pérdida de la carrera, pero a menudo se debe a la separación ineficaz del gas del líquido bombeado. A partir de esta aplicación dio paso a desarrollar modelos teóricos y prácticos acerca de los problemas de vibración en los pozos, analizando la relación entre la vibración y los extremos de las cartas dinamométricas. J.C. Slonneger desarrolló un método simplificado para calcular las frecuencias de vibración de la varilla de succión y la herramienta de cable, aplicó el método para elaborar una serie de cartas teóricas y compararlas con las cartas dinamométricas de los pozos en operación. La comparación confirmó el método teórico [1].

Fue hasta principios de la década de 1960, cuando Sam G. Gibbs dedujo una derivación de la ecuación de onda para modelar el comportamiento elástico de la sarta de varillas, que desarrolló un modelo dinámico tomando en cuenta el comportamiento medido durante un determinado tiempo y que son registrados los trazos en las cartas dinamométricas. Tomando en cuenta la ecuación de onda que surgió de la dinámica newtoniana y la ley de elasticidad de Hooke, La ecuación de Gibbs incluye los efectos de fricción.

El aporte de Gibbs a lo largo de los años ha permitido a la industria diagnosticar problemas en las instalaciones, al igual que un modelado predictivo para un nuevo diseño en la instalación [1].

I.1 Historia del Gas Lift

De todos los tipos de levantamiento artificial, el levantamiento por inyección de gas es el más antiguo de todos.

Silas Frederick Shaw un pionero especialista en flujo, escribió en 1927 la influencia de gas asociado a los yacimientos de aceite, explicando que este gas se mezcla o se disuelve en el aceite provocando la producción natural del mismo, en caso contrario de yacimientos que no tenían gas asociado, la presión ya no era suficiente para permitir el flujo de aceite a la superficie.

El método se caracteriza por inyectar gas en la tubería de producción para reducir la presión hidrostática de la columna de fluido, por lo general, el gas de inyección es circulado por el espacio anular existente entre la tubería de revestimiento y la tubería de producción, el cual ingresa a la tubería de producción a través de un arreglo de válvulas de levantamiento artificial por gas. El posicionamiento de las válvulas o la válvula, la presión de operación y la tasa de inyección de gas, serán determinadas por las condiciones del pozo.

I.2 Inicios del levantamiento artificial con aire

En la década de 1800, los métodos para extraer artificialmente agua de los pozos iban en continuo ascenso, sumándose el aporte de un ingeniero en minas de origen alemán, de nombre Carl Emanuel Löscher (1750-1815), quien en su método usaba aire comprimido para bombear agua, por lo que parecía lógico adaptar los métodos de levantamiento de aire en pozos de agua para el uso en pozos petroleros.

De acuerdo con J. H. A. Bone, el primer pozo en utilizar aire comprimido como método artificial, fue el pozo Empire 1, del cual se registró una producción inicial de 3,000 (b/d) y después de 8 meses dejó de producir. Bone describe un método de levantamiento artificial que consistía en usar una bomba de aire con dos tubos dentro de la tubería del pozo. El aire es inyectado a presión hasta el fondo del pozo, y el aceite fluye hacia la superficie. A partir

del uso de bombas de aire o eyectores gran número de pozos que habían dejado de producir, fueron puestos a producción nuevamente.

Thomas B. Gunning, Figura 1.2, obtuvo una patente por un eyector de petróleo el 22 de noviembre de 1864, refiriéndose al mismo como un medio nuevo y útil para expulsar o forzar el aceite de pozos petroleros.

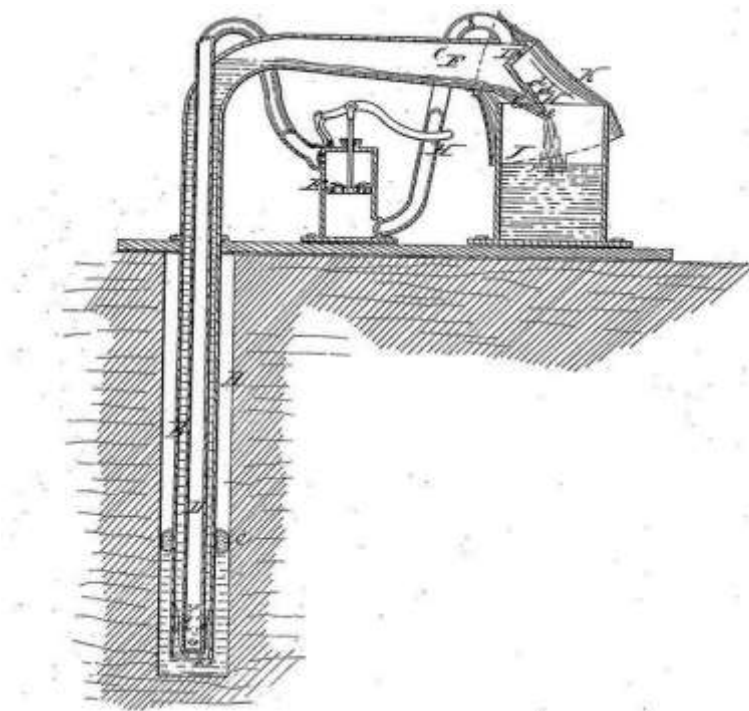


Figura 1.2 Diseño patentado por Thomas B. Gunning relacionado con el dispositivo Aire-lift 1864 [1].

A pesar de que se utilizaba el levantamiento artificial con gas, alrededor del año de 1900, muchos ingenieros e inventores exploraron los medios para mejorar dicha elevación de aire con estudios de investigación teóricos y prácticos que ayudaron a la comprensión de las propiedades del aire. Ahora sabemos que el aire atmosférico de la Tierra se compone de varios gases. Hay concentraciones constantes, en volumen, de nitrógeno (78.084%) y oxígeno (20.946%), junto con concentraciones mucho más pequeñas (en orden descendente) de argón, neón, helio, metano, criptón, hidrógeno, óxido nitroso y xenón. Los gases más importantes presentes en concentraciones variables, por volumen, son vapor de agua, dióxido de carbono, ozono, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno.

Sin embargo, el aire que era utilizado para el levantamiento artificial generalmente se extraía de las instalaciones del pozo petrolero. Lo que significaba, que estando cerca del pozo, el porcentaje de gases normalmente presentes en el aire atmosférico no era misma. Los gases que se encuentran en el aire del medio ambiente pueden incluir vapores de petróleo y gases componentes del gas natural, principalmente metano y posiblemente etano, propano, butano, pentano, dióxido de carbono, nitrógeno y/o sulfuro de hidrógeno.

Dicho esto, los gases del aire en el medio ambiente pueden interactuar entre sí mismos, con el equipo de extracción de aire y otros equipos de producción, o con el mismo aceite.

I.3 Transición del levantamiento artificial con aire al gas lift

En el año de 1911, en el condado de Santa Barbara, California, en el campo Cat Canyon, se realizaron las primeras pruebas de bombeo que involucraban el uso de gas natural a alta presión en lugar de aire para asistir de energía al pozo y permitir el flujo de aceite.

Fue a mediados y finales de la década de 1920, se realizaron pruebas con equipos de levantamiento artificial con gas, las cuales se iban realizando sobre la vida productiva de los pozos y se implementaron sin una solicitud de patente; el desarrollo e invención de válvulas, a nivel teórico, las relaciones gas-aceite, la densidad del aceite y el flujo en diferentes tipos de condiciones de presión-temperatura.

Los primeros dispositivos comercialmente significativos se hicieron a principios de la década de 1920 y finales de 1950. Alexander Boynton, J. Oliphant, Halbert B. Havorsen, James W. Taylor, Thomas E. Bryan, Herbert C. Otis, Charles S. Crickmer, Jeddy D. Nixon y Henry Udell Garret fueron los más grandes aportadores de mejoras para los equipos de levantamiento artificial.

El uso de inyección de gas natural en lugar del aire fue el desarrollo más importante ya no sólo redujo los peligros de las mezclas inflamables y explosivas formadas cuando se usa el aire, si no que también permitió recuperar grandes cantidades de condensado.

En 1975, Buford Neely definió dos tipos de levantamiento de gas, uno continuo y otro intermitente; el primero es un proceso de inyección continuo de gas a una presión relativamente alta para reducir el gradiente de flujo, la gran mayoría de los pozos usan este tipo de flujo, que es muy similar al flujo natural. La inyección intermitente consiste en esperar un período de tiempo relativamente corto para permitir que una cantidad de aceite sea acumulada y después desplazada a superficie con la inyección.

I.4 Inicios del bombeo electrosumergible

La aparición del bombeo electro sumergible coincide con el desarrollo del generador eléctrico, que comenzó alrededor de 1880.

En 1894 se entregó la primera patente relacionada con el bombeo electrosumergible aplicada en la producción de aceite a Harry W. Pickett que usaba un motor rotatorio eléctrico de fondo para accionar una bomba de émbolo.

I.5 Historia del bombeo hidráulico

Existen dos tipos de bombeo hidráulico aplicado al levantamiento artificial en la industria petrolera: Bombeo hidráulico reciprocante, de una y doble acción y el Bombeo tipo Jet.

El bombeo hidráulico de pistón de acción simple y doble

En el siglo XVIII, durante los inicios de la máquina de vapor, una de las aplicaciones del cilindro de vapor era operar las bombas conectando directamente el vástago del motor a la bomba. A partir de esa idea se diseñaron variantes de las bombas hidráulicas.

Una de las primeras variaciones fue el motor de bomba Bull Cornish de 1798, diseñada por William Bull y Richard Trevithick. Ellos diseñaron una bomba de vapor de acción directa

con el cilindro. Una viga fue unida a la barra de bombeo a la que se le aplicó peso para equilibrar la carga de la barra.

La primera patente relacionada con este tipo de bomba y aplicada en un pozo petrolero, fue otorgada a Hiram W. Faucett y Alexander T. Comer en el año de 1872. Más tarde, en el año 1878 mejoraron el proceso de bombeo y aprovecharon el calor generado de la misma y el vapor de escape para evitar la acumulación de sólidos en los pozos.

Arthut G. Gage recibió gran número de patentes entregadas, considerado como uno de los pioneros del bombeo hidráulico en la industria petrolera. Probó con éxito su bomba nombrada como Gage en el Condado de Los Ángeles California, en junio de 1924.

En la mejora de bombas para pozos profundos se entregó una patente en 1925 a C. H. Williams y L. M. Kellogg. En ese mismo año John H. Suter también recibió una por ser la primera en mostrar una bomba de inserción sujeta al interior de la tubería, Fig. 1.3, esta bomba subsuperficial puede conectarse a la sarta de varillas sin sacar la T. P. a la superficie, sólo se saca la sarta de varillas. La diferencia que existe con la bomba de la tubería de producción es sólo la forma en que se coloca la camisa de la bomba, esta va conectada en el extremo inferior de la T. P. y se introduce al pozo como parte de la sarta de producción.

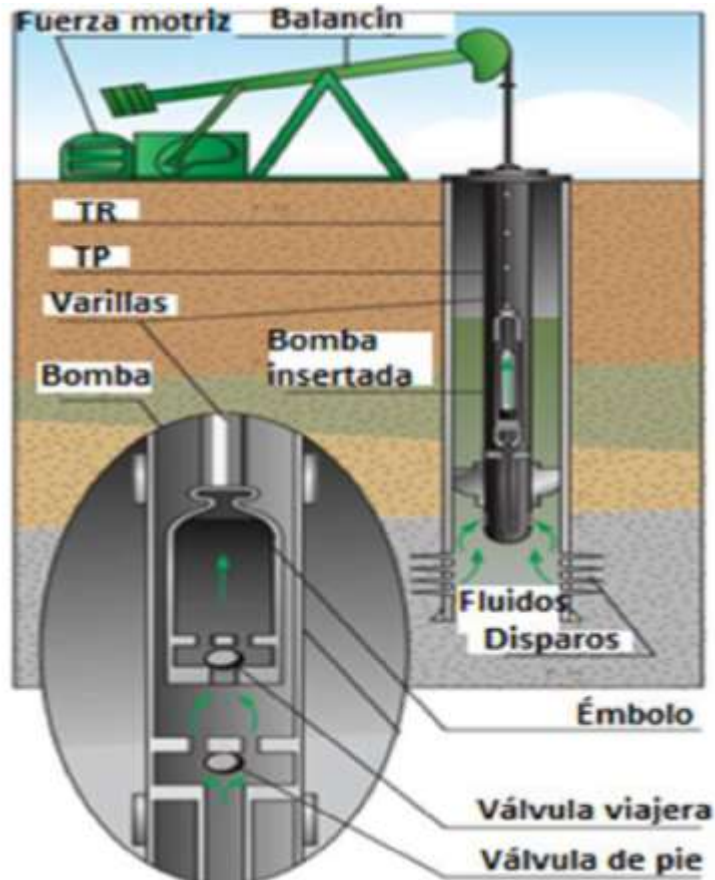


Figura 1.3 Bomba insertada en la tubería de producción [2].

I.6 Bombeo tipo jet

La característica por la que destaca este sistema de bombeo es que no tiene partes móviles; el mecanismo de bombeo es generado por la transferencia de energía entre dos corrientes de fluido en movimiento (fluido motriz y los fluidos producidos). La eficiencia energética es baja. Sin embargo, las bombas tipo jet son confiables, requieren de poco mantenimiento y grandes capacidades de volumen. Su introducción al mercado fue en 1970.

Sus orígenes se remontan al año de 1852 en Inglaterra en donde se usó por primera vez el bombeo hidráulico a chorro, el cual se le acreditó a Jame Thomson. La teoría de bombeo jet fue desarrollada por J. M. Rankine en 1870.

El modelo de bomba “libre” marca Kobe, tipo A, se conecta a la tubería de revestimiento y descargando por el espacio anular. La bomba tipo B es colocada en el fondo del pozo y la descarga también se realiza por el espacio anular. La succión del fluido se realiza a través de un mecanismo colocado en la entrada de la cámara, con ayuda de una cámara de mezclado grande y de una tobera. Las características de estos modelos pueden observarse en la Figura 1.4.

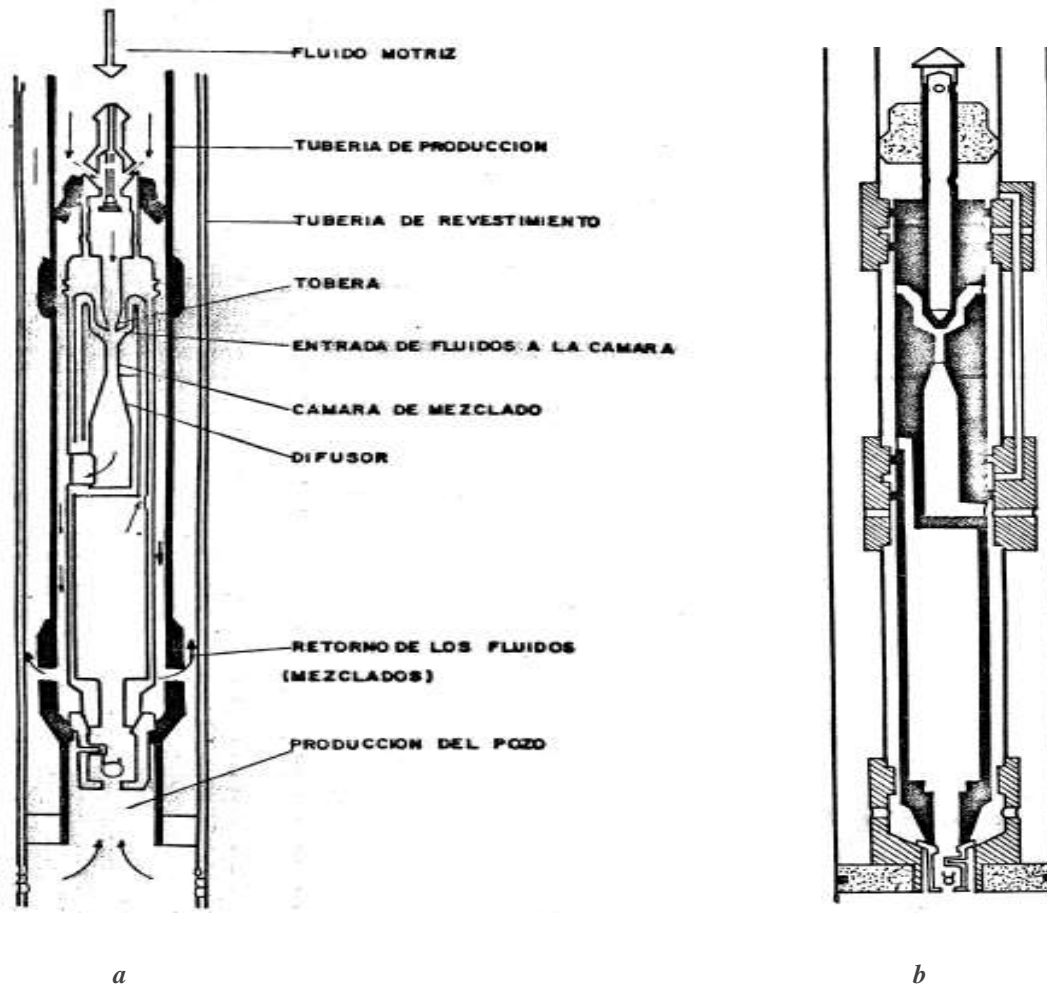


Figura 1.4 a) Bomba Kobe tipo A de tipo chorro, b) Bomba Kobe tipo B de T.R [3].

I. 7 Bombeo de cavidades progresivas

Las bombas de cavidades progresivas se basan en un mecanismo de engranaje inventado por René Joseph Louis Moineau, recibiendo así su segunda patente en 1937.

La idea tiene sus orígenes en una bomba para levantar agua llamada “tornillo de Arquímedes”.

En la industria petrolera se utiliza el mecanismo de Moineau para el levantamiento artificial, así como para impulsar los motores de fondo para el lodo de perforación.

En el año de 1936 se introdujo al mercado un *Progressive Cave Pumping* (PCP) en el fondo del pozo, que es una bomba de desplazamiento positivo que consta de dos partes: un rotor helicoidal de acero conectado a la parte inferior de la sarta de varillas y un estator fijo que se introduce en el pozo en la parte inferior de la tubería de producción. El estator tiene una forma elastomérica formada con una hélice interna múltiple adaptada al rotor. Cuando el sistema es encendido en superficie gira la cadena de varillas, el rotor gira dentro del estator fijo, creando así la acción de bombeo.

La Figura 1.5 es un esquema de una bomba de cavidades progresiva.



Figura 1.5 Bombas de cavidades progresivas [1].

Hoy en día un gran número de pozos inician o continúan su producción con ayuda de algún tipo de levantamiento artificial; México es uno de los mayores productores de hidrocarburo a nivel mundial y gran parte de estos campos se encuentran en su etapa madura de producción es por eso por lo que se requiere implementar mecanismos que ayuden a mantener o elevar la producción de estos.

En este trabajo hablaremos en particular del Bombeo Neumático que consiste en inyectar gas a presión por el espacio anular que se mezcla en la tubería de producción con los fluidos del yacimiento, aligerando la columna hidrostática, permitiendo que el pozo opere a una menor presión de fondo manteniendo o aumentando la producción.

El bombeo Neumático comienza su trabajo en superficie, en donde se encuentra un compresor de gas, que transmite al pozo una corriente de gas a alta presión para que se eleven los fluidos desde el punto de inyección hasta la superficie. Este sistema artificial puede aplicarse para un campo o grupo de pozos.

Las partes fundamentales que constituyen el **BN** son [5]:

- Fuente de gas a alta presión. Estación de compresión, pozo productor de gas a alta presión o compresor a boca de pozo.
- Un sistema de control de gas en la cabeza del pozo, válvula motora controlada por un reloj o un estrangulador ajustable (válvula de aguja).
- Sistema de control de gas subsuperficial (válvulas de inyección con mandril).
- Equipo necesario para el manejo y almacenamiento del fluido producido.

Un ejemplo de una instalación de bombeo neumático con los dispositivos nombrados anteriormente se ilustra en la Figura. 1.6.

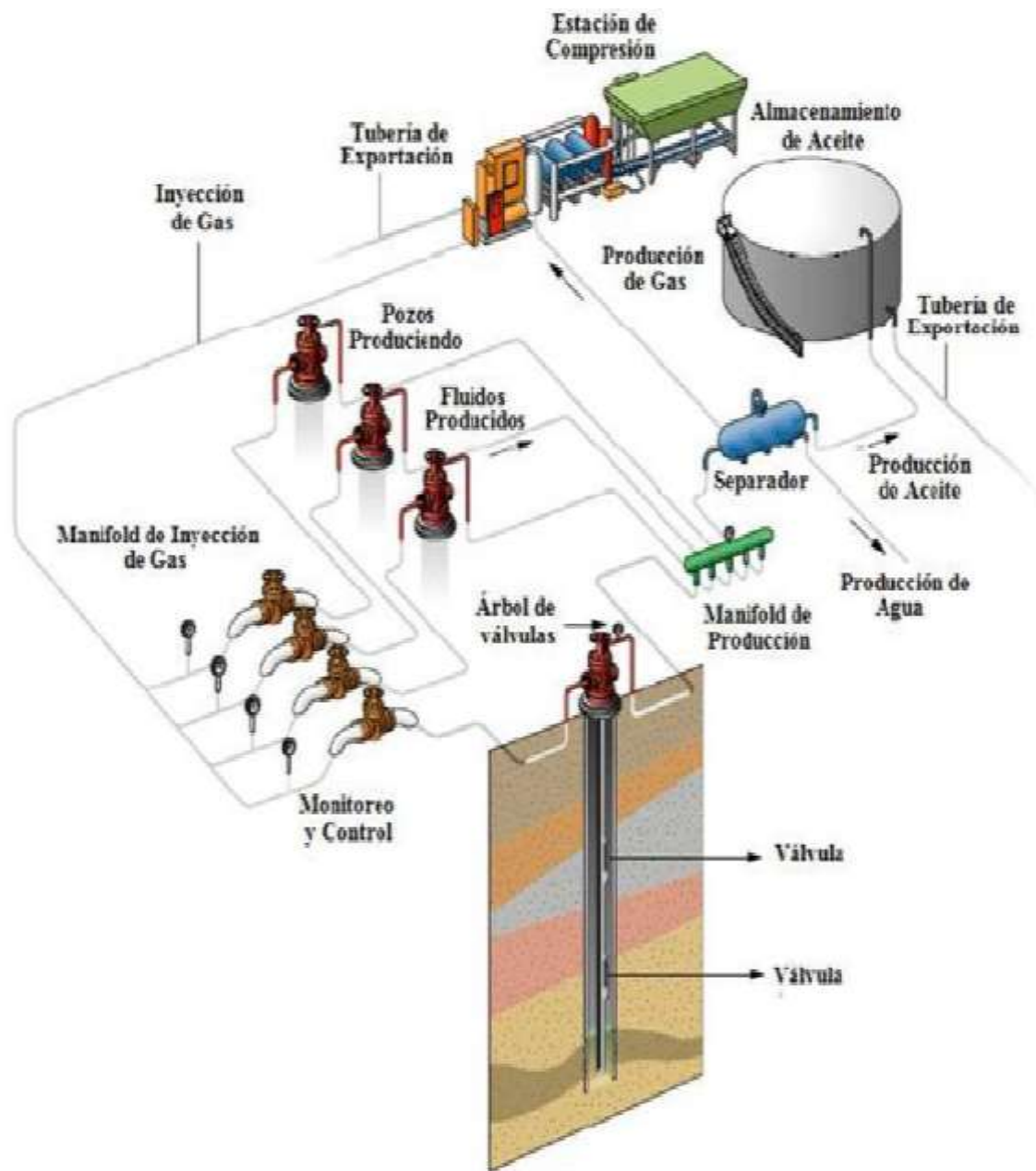


Figura 1.6 Esquema de Instalaciones de Bombeo Neumático [5].

CAPÍTULO II

CLASIFICACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE VÁLVULAS PARA BOMBEO NEUMÁTICO

Una definición de válvula en forma general, sin involucrar características físicas, ventajas, limitaciones o funciones que la válvula pueda desarrollar es la siguiente: Una válvula es un dispositivo mecánico que nos permite controlar el flujo de los fluidos en fases líquida y gaseosa que pasan a través de la tubería de origen hacia otro punto.

Las válvulas pueden tener diversas aplicaciones como pueden ser: abrir, cerrar, conectar y desconectar, regular, modular o aislar una gran serie de fluidos ya sean corrosivos o tóxicos.

La importancia que tienen en la producción y transporte se debe a la composición de los fluidos, en ocasiones pueden ser corrosivos y las condiciones de flujo que se presentan, van acompañadas de una fuerte variación de presión y temperatura, así como la presencia de sólidos arrastrados por el flujo.

La presencia de agentes corrosivos y en contacto permanente con las válvulas pueden generar daños a estos accesorios. Cuando se presentan este tipo de accidentes, la intervención oportuna, puede representar el ahorro de miles o millones de pesos.

Como mencionamos al principio del capítulo, en la definición, las válvulas deberán cumplir con ciertos objetivos generales con los que podrán satisfacer las necesidades operativas de flujo; las funciones fundamentales de operación son las siguientes:

- Inicio y paro de flujo

La válvula ideal es la que permite al fluido desplazarse a través de ella, con poca restricción al flujo y una mínima caída de presión, cuando está totalmente abierta, además de proporcionar un sello impermeable cuando se encuentra totalmente cerrada.

- Estrangulamiento

El estrangulador también es conocido como un regulador de flujo, llevándose a cabo con la restricción al flujo, por cada cambio de dirección del flujo o por una combinación de ambos. Esta operación normalmente se logra con válvulas de globo, de aguja y de ángulo, las dos primeras generalmente cuentan con un disco que permite controlar más estrechamente la regulación de flujo.

- Prevención del contraflujo

Su función como bien lo indica es prevenir el flujo inverso en la tubería, esta es una función de las válvulas check o de retención, que van a permitir el flujo en un solo sentido, manteniéndose abierta durante el paso de fluido, pero si éste se regresa, automáticamente empuja el disco de la válvula generando un sello hermético evitando así el contraflujo.

- Regulación de presión

Para cualquier tipo de sistema la llegada de presión deberá ser regulada o reducida a la presión de servicio. No sólo hacen que reduzca la presión, sino que también la mantienen a un nivel estándar de operación. Este tipo de válvulas tienen una calibración de operación y abren o cierran de manera automática.

- Alivio de presión

Este tipo de válvulas tienen diversas aplicaciones como en líneas de conducción, así como en estaciones. Las presiones excesivas pueden causar daños severos en el sistema de producción y para prevenirlo, se colocan válvulas de alivio [9].

II. 1 Mecanismos de las válvulas de bombeo neumático

Las partes que conforman una válvula de Bombeo Neumático se muestra en la Figura 2.1.

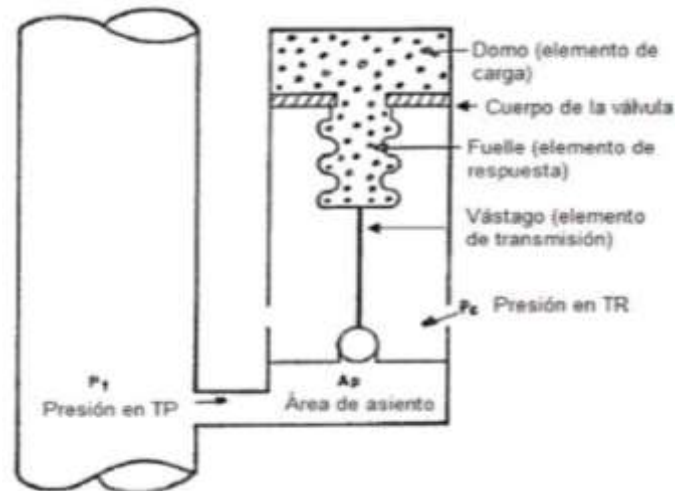


Figura 2.1 Partes fundamentales de una válvula [6].

Las válvulas para Bombeo Neumático (BN) están diseñadas para permanecer cerradas hasta que las condiciones de presión en el espacio anular y en la tubería de producción (TP) cambien. Al abrirse la válvula, permite que el gas pase del espacio anular a la tubería de producción o viceversa. En la Fig. 2.1 se ilustra el principio operativo involucrado. Los mecanismos que intervienen para mantener la válvula cerrada son:

- Un fuelle de metal cargado con gas a presión, comúnmente con nitrógeno; y
- Un fuelle metálico y un resorte de compresión.

Para cualquiera de los puntos anteriores, la presión de operación de la válvula es ajustada en la superficie antes de que la válvula entre al pozo, también se puede ajustar la compresión del resorte y la cúpula del fuelle se puede cargar a la presión deseada

Las fuerzas que causan la apertura de las válvulas para BN son:

- La presión del gas en el espacio anular
- La presión del gas y el flujo en la tubería.

A medida que continúa la descarga de los fluidos (gas-líquido) de la tubería las condiciones en el pozo van cambiando, la válvula cerrará y dejará de pasar el gas desde el espacio anular. Para el caso de inyección continua, la válvula permanecerá abierta en el punto de inyección. Por otra parte, para el caso de flujo intermitente, la válvula de inyección, colocada en el fondo del pozo, abrirá cuando la presión en el espacio anular alcance la presión requerida y cerrará cuando la presión decaiga por debajo de cierto nivel [7].

La denominada válvula operativa es la que controlará la inyección de gas. Las demás válvulas son instaladas por encima de la válvula operativa para ayudar a producir el pozo, tal como puede observarse en la Figura 2.2.

Una vez que los fluidos llegaron a la superficie, se cerrarán para evitar que el gas sea inyectado por arriba de la válvula operativa.

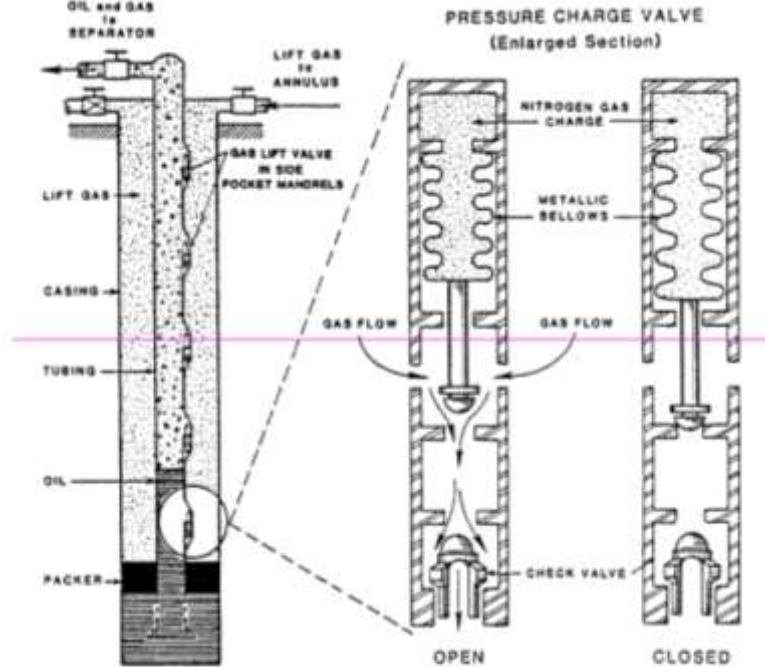


Figura 2.2 Fuelle de una válvula para inyección de gas [6].

En general, las válvulas deben satisfacer las siguientes dos condiciones.

1. Para el BN Continuo la válvula debe ser capaz de estrangular el gas manteniendo la presión constante dentro de la tubería. Para lograr una máxima eficiencia esta válvula deberá ser capaz de cambiar el tamaño del orificio, de tal manera que actúa como un regulador encargándose de la inyección de gas en la superficie. Las válvulas para flujo continuo pueden abrirse bajo las siguientes condiciones:
 - a) Incremento de presión en la tubería de revestimiento.
 - b) Incremento de la presión en la tubería de producción.
 - c) Una combinación en el aumento de presión en la tubería de revestimiento (TR) y en la tubería de producción (TP).

2. Las válvulas para BN Intermitente tienen la característica de abrirse lo más grande posible de manera inmediata después de activarse para la apertura y debe ser capaz de mantenerse completamente abierta hasta el momento del cierre.

Las válvulas para flujo intermitente se pueden abrir de las siguientes maneras:

- a) Por la acumulación de presión en el espacio anular.
- b) Sólo por la acumulación de carga del fluido en la tubería.
- c) Por una combinación de la presión en la tubería de revestimiento y la acumulación de presión en la tubería.

A continuación, se mostrará un diagrama, Figura 2.3, con los diferentes tipos de válvulas clasificadas por su tipo de respuesta al momento de abrir y cerrar, por su operación, y por su dispositivo.

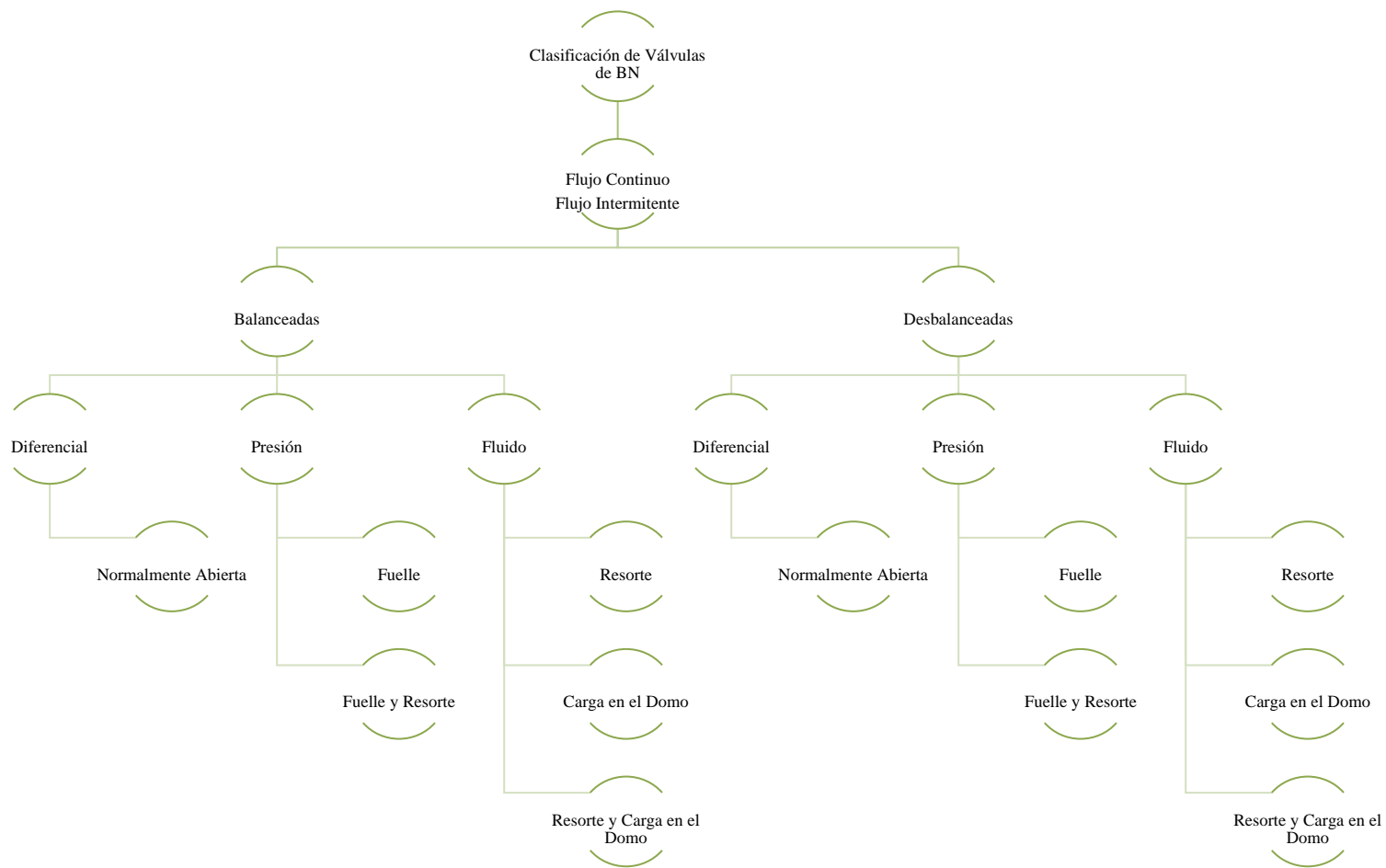


Figura 2.3 Clasificación de las válvulas de Bombeo Neumático [6]

II. 2 Tipos de válvulas de bombeo neumático

II.2.1. Válvulas Balanceadas

La característica por la cual se distingue este tipo de válvula es por la nula influencia de la presión en la TP, ya sea que se encuentre en una posición de apertura o cierre. La presión por la cual se encuentran influenciadas es por la presión en la TR, actuando todo el tiempo en el área del fuelle; esto quiere decir que la válvula abre y cierra a la misma presión (Presión de domo) [4]. En la Figura 2.4, se muestra un esquema de este tipo de válvulas; Se puede observar también que la presión del domo es igual a la presión en la TR con lo que se consigue el cierre de la válvula.

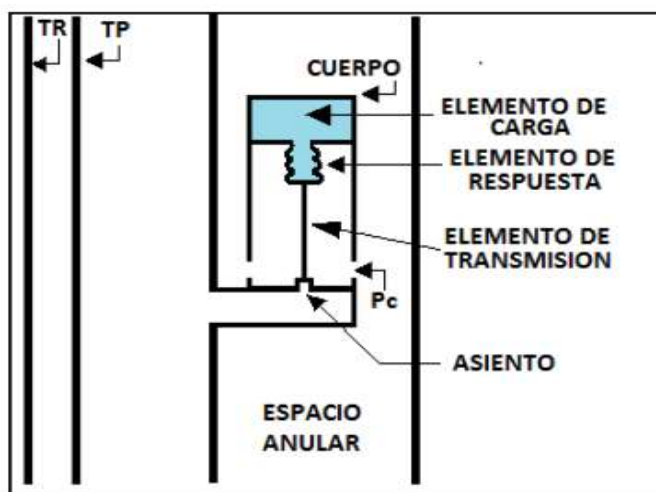


Figura 2.4 Válvula balanceada [2].

II.2.2. Válvulas Desbalanceadas

Las válvulas de presión desbalanceadas tienen la particularidad de tener un rango de presión limitado por una presión superior determinada y cerrar con una presión inferior a la de apertura, dichas condiciones dependen del pozo.

Como lo vimos en la Figura 2.3 la clasificación es la misma para las válvulas balanceadas, a excepción de la válvula reguladora de presión. Los tipos de válvulas se describen a continuación:

II.2.2.1. Válvula operada por presión del gas de inyección

Normalmente se le conoce como válvula de presión, la sensibilidad de esta válvula va del 50 al 100% a la presión en la tubería de revestimiento cuando se encuentra cerrada y cuando se encuentra abierta tiene una sensibilidad del 100%. Explicado de otra manera, para su apertura se requiere un aumento de presión en el espacio anular mientras que para cerrar la válvula se requiere de una reducción de la presión en la TR.

II.2.2.2. Válvula reguladora de presión

Comúnmente esta válvula es llamada como válvula proporcional o válvula de flujo continuo. Las condiciones de apertura y cierre son las mismas a la válvula de presión. Una vez que la válvula se encuentra abierta se requiere de una disminución de la presión en la TP o en la TR para su cierre. En el caso que la reducción de presión se de en la tubería de producción, deberá permanecer abierta, por el diferencial ya que para que abra, la presión en el espacio anular es mayor que en la tubería de producción.

II.2.2.3. Válvula operada por los fluidos de la formación

Esta válvula presenta un rango de sensibilidad de 50 a 100% a la presión en la tubería de producción cuando está en posición cerrada y un 100% de sensibilidad en la TP cuando se encuentra abierta. Lo que quiere decir que se necesita un incremento de presión en la tubería de producción para lograr el cierre de la válvula.

II.2.2.4. Válvula combinada

También es conocida como válvula de presión operada por fluidos y por presión del gas de inyección; para su apertura se requiere de un incremento de presión del fluido, mientras que para el cierre bastará con reducir la presión en el espacio anular o en la TP [7].

II.3 Clasificación de las válvulas de Bombeo Neumático de acuerdo con el tipo de flujo

Para entender el mecanismo de funcionamiento de este tipo de válvulas explicaremos el proceso de inyección Continuo e Intermitente y así comprender las diferentes características y funcionamiento que deben cumplir las válvulas para cada método de bombeo.

Las válvulas de inyección de gas se dividen en dos tipos de acuerdo con su operación:

II.3.1. Válvulas para flujo continuo

Su función consiste en mantener siempre la columna de fluidos ligera a través de una inyección de gas continua, produciendo una disminución del gradiente de presión en la columna hidrostática y junto con la expansión del gas facilite a los fluidos subir a superficie.

Este tipo de válvulas debe ser sensible a la presión en la TP en la posición de apertura, su respuesta a un cambio de presión debe ser proporcional. Cuando la presión decrezca la válvula deberá empezar a regular el cierre, para disminuir el paso del gas. En caso, cuando la presión aumenta en la TP, la válvula debe regular la apertura en la cual se incrementa en flujo de gas a través de esta [7].

Operación del Bombeo Neumático Continuo

Este método consta de introducir un flujo continuo de gas a alta presión comúnmente por el espacio anular a la tubería de producción para aligerar la columna de fluidos, hasta que, la reducción de la presión de fondo permita una diferencial suficiente a través de la formación, provocando que el pozo produzca. Para que esto se pueda llevar a cabo; una válvula es colocada en el punto de inyección más profundo, sumando la disponibilidad del gas a inyectar, una válvula reguladora en la superficie.

El principio fundamental de este método artificial se debe a la energía resultante de la expansión del gas inyectado por el espacio anular y que va de una alta presión a una baja

para promover el flujo de fluidos en un pozo. La inyección se lleva a cabo de una manera continua y controlada. En la Figura 5.2 se ilustra este tipo de bombeo, tomando en cuenta que se basa en un solo punto de inyección de gas. Las válvulas de flujo continuo se distribuyen de acuerdo con el nivel estático del fluido y de la presión del gas que se va a inyectar.

Logrando mantener una presión constante en el espacio anular durante la descarga del fluido de control, permite que todas las válvulas en el aparejo permanezcan abiertas, durante este proceso las válvulas de flujo continuo se cierran a medida que la presión hidrostática en el espacio anular disminuye, dejando abierta la válvula operante [9].

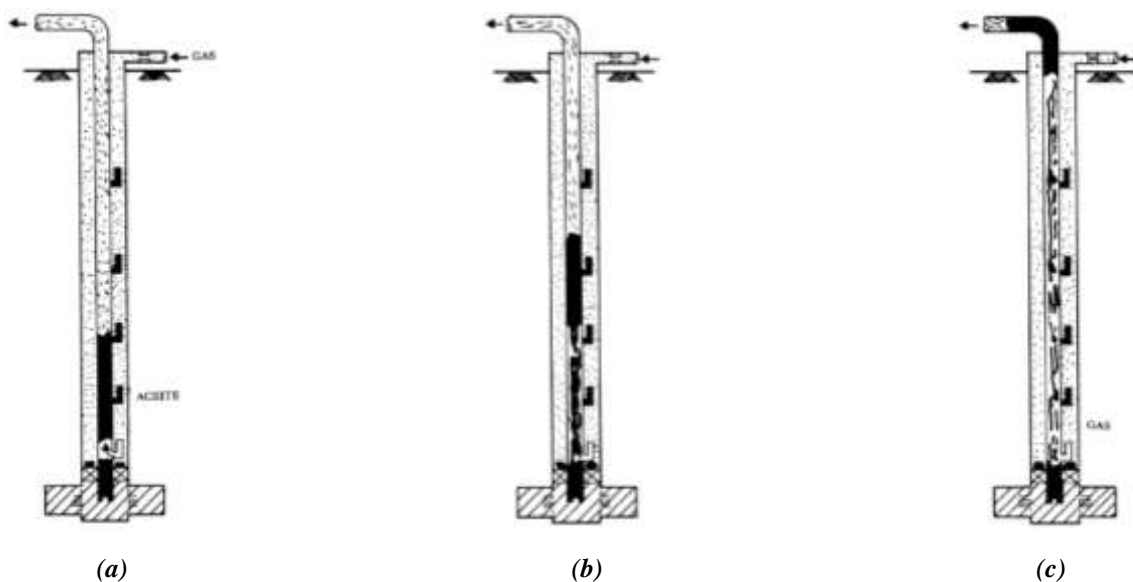


Figura 2.5 Instalación de BN para flujo continuo en tres etapas [5].

II.3.2. Válvulas para flujo intermitente

Consiste en llevar a cabo una inyección de gas a grandes volúmenes en un tiempo corto por debajo de la columna del fluido en la tubería de producción y levantar la columna hasta la superficie.

Operación del Bombeo Neumático Intermitente

El bombeo neumático intermitente consiste en producir periódicamente determinado volumen de aceite impulsado por el gas que se inyecta a alta presión desde la superficie al espacio anular por medio de un regulador, un interruptor o por la combinación de ambos; después el gas pasa a la TP por medio de una válvula que va colocada en la TP; y así finalmente, los fluidos son expulsados al exterior en forma de tapón o bache de aceite por la energía del gas. Un ejemplo de ese método de inyección puede observarse en la Figura 2.6. Un fenómeno que se presenta es el de “resbalamiento” del aceite que tiene lugar en la tubería de producción, lo que significa que sólo una parte del volumen inicial de aceite es recuperado en la superficie, mientras que el resto del aceite cae al fondo del pozo integrándose al nuevo bache de aceite en formación. Llegado un periodo de inactividad que ocurre después de cerrar la válvula. En este periodo la formación sigue aportando fluidos al pozo, hasta acumular otro volumen de aceite con el cual se iniciará otro ciclo [7].

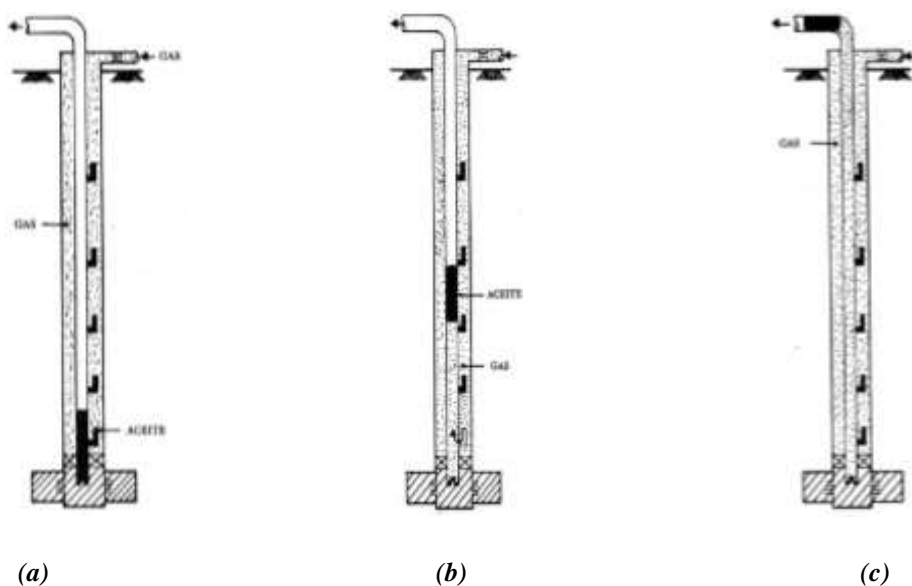


Figura 2.6 Bombeo Neumático Intermitente en tres etapas [5].

Las ecuaciones que se ven implicadas en los mecanismos de apertura y cierre de las válvulas de inyección se mencionan a detalle en el capítulo siguiente.

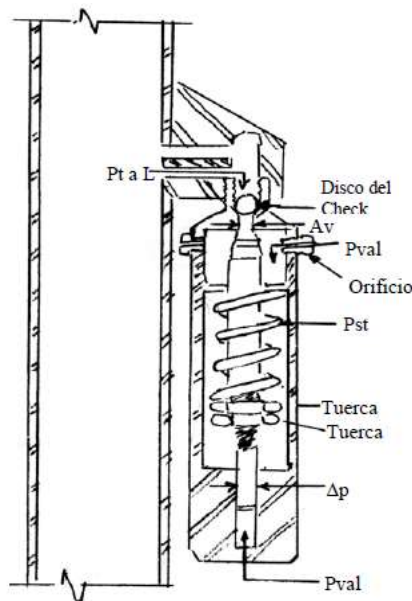
Las válvulas para Bombeo Neumático más conocidas en el mercado son las siguientes:

II.3.2.1. Válvula diferencial

Este tipo de válvula opera mediante una diferencia de presiones entre la tubería de revestimiento y la tubería de producción, aun cuando una válvula diferencial es principalmente una válvula actuada por la tubería de producción no es una válvula operada por presión, es una válvula que normalmente está abierta.

Estas válvulas se utilizan para flujo continuo para ciertas aplicaciones, pero no para flujo intermitente.

En la Figura 2.7, se ilustra una válvula diferencial con las partes que la componen y las fuerzas involucradas.



$P_t a L$ = Presión de la tubería de producción a la profundidad de la válvula (lb/pg^2)

A_v = Área del orificio

P_{val} = Presión de la tubería de revestimiento a la profundidad de la válvula (lb/pg^2)

P_{st} = Efecto de la presión del resorte

Figura 2.7 Válvula Diferencial en un Pozo lista para abrir.

II.3.2.2. Válvula operada por fluido

Una válvula operada por fluido se verá influenciada por la presión en la tubería de producción, ya que es la presión que ejerce sobre el área de fuelle de la válvula. Figura 2.8.

Un mandril para una válvula operada por fluido y una válvula de contrapresión, se emplea para la operación de presión en la tubería de producción.

Las válvulas recuperables operadas por fluido difieren en construcción de las válvulas operadas por presión debido a que el mismo mandril recuperable se utiliza para ambas operaciones, en consecuencia, la válvula deberá estar diseñada a las presiones en la tubería de producción, en vez de la presión en la tubería de revestimiento. Así cuando la válvula que opera por fluido comienza su apertura, la presión de la TR es generalmente entre 150 a 200 (lb/pg²) mayor que la presión de la tubería de producción a la profundidad de la válvula.

En resultado, el aumento total en la presión opuesta al fuelle una vez que la válvula abre es mucho mayor que el de una válvula operada por presión, por eso es importante que se utilicen ciertos dispositivos para restringir el cambio de la posición de los fuelles en una válvula operada por presión en la tubería de producción para asegurar una vida prolongada en el fuelle [7].

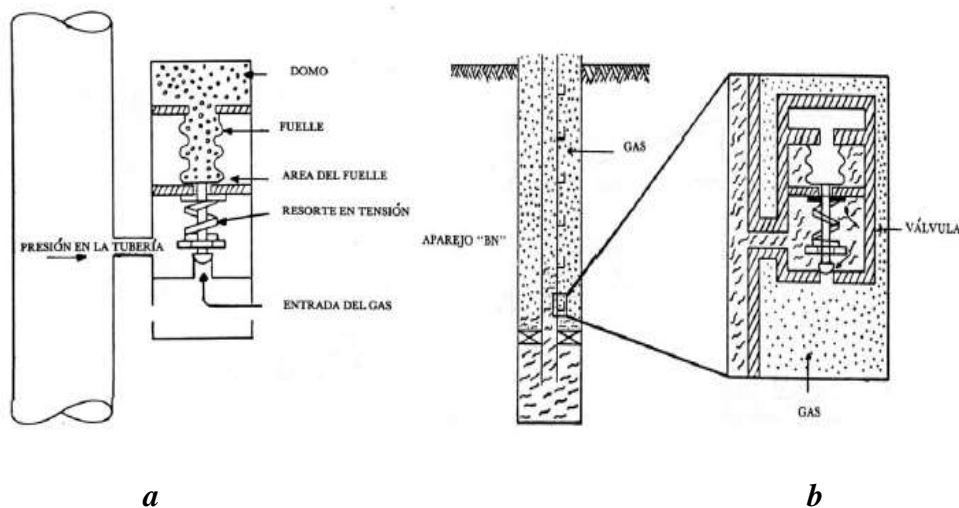


Figura 2.8 a) Detalle de una Válvula Operada por Fluido, b) Aparato de BN. Válvula operada por fluido [3].

II.3.2.3. Válvula Operada por Presión

Se caracterizan por la fuerza de carga que hace mantener la válvula cerrada hasta que se coloca en el pozo, la presión ejercida en el espacio anular es la que controla el mecanismo de apertura y cierre de la válvula. Figura 2.9.

Esta válvula posee más características de control del pozo por lo que suelen ser las más utilizadas en todas las instalaciones de Bombeo Neumático [7].

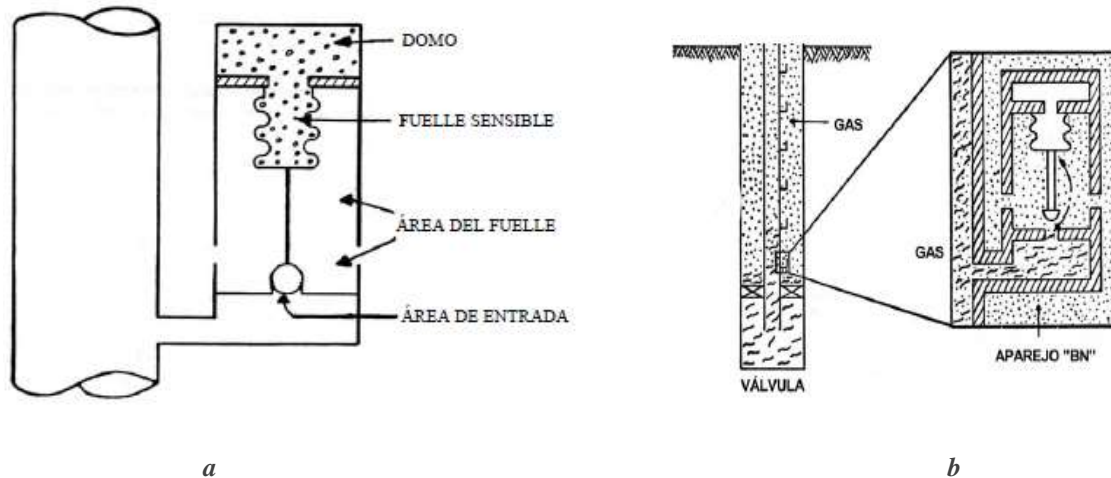


Figura 2.9 a) Aparejo de BN de una válvula Operada por Presión, b) Detalles de una Válvula Operada por Presión [7].

Además de los tipos más conocidos de válvulas existen otros tipos de válvulas operadas por presión que funcionan con un mecanismo de fuelle o resorte o combinado:

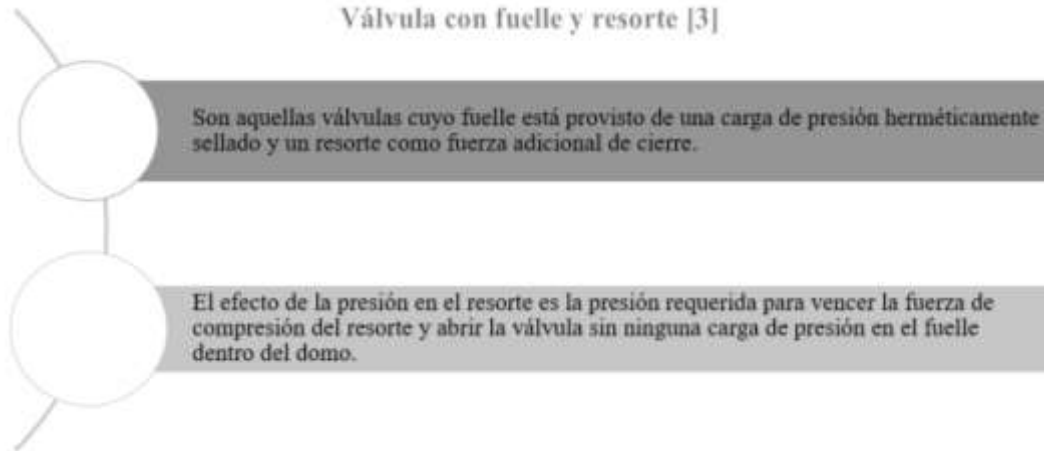
II.3.2.4. Válvula operada por presión con carga de nitrógeno en el fuelle.

Válvula Operada por Presión con carga de Nitrógeno en el fuelle [3]

Constituidas por:	Mecanismo de funcionamiento.	Características del N ₂
<ul style="list-style-type: none">• Fuelle sellado para el rango de ajuste de presión deseado.• Camisa del fuelle.• Válvula de retención.	<ul style="list-style-type: none">• Cuando la presión en la TP permanece cte. Y la presión en la TR va aumentando, la válvula comienza a abrir y el viaje del vástago aumentará proporcionalmente, siempre y cuando la presión de la TP permanezca constante. Por el contrario, si la presión de la TP decrece, el vástago se acercará al asiento y reducirá el paso de la inyección de gas a través de la válvula.	<ul style="list-style-type: none">• Es un gas incoloro.• No tiene sabor.• No tiene olor.• Es menos denso que el aire. • En condiciones estándares:<ul style="list-style-type: none">• Es un elemento inactivo.• No es un carburante.• No es combustible.• No se combina con otros elementos.

II.3.2.5. Válvula con fuelle y resorte

Válvula con fuelle y resorte [3]



CAPÍTULO III

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA VÁLVULA PARA BN

En este capítulo hablamos de los primeros indicios del diseño de válvulas para **BN**, describimos el diseño de una válvula de inyección de gas balanceada para generar Bombeo Neumático Continuo (**BNC**), cuyo sistema artificial es el más utilizado en México, actualmente más del 50 % de los pozos productores utilizan un tipo de Bombeo Neumático (**BN**). Además, abordaremos el análisis de las fuerzas que intervienen para la definición de las ecuaciones que rigen su funcionamiento.

III.1 Desarrollo de las Válvulas en el tiempo

En 1965 A. Brear publicó la primera patente, Figura 3.1, para la generación de **BN**, que consiste en un mecanismo dispuesto en la base de la tubería de producción, el gas es pasado por la región anular, presente entre las tuberías de revestimiento y la de producción. El gas entra a la tubería de producción por la parte baja de la tubería mezclándose con el aceite en la misma área, generando una reducción de la densidad en la columna hidrostática, logrando así la producción del pozo.

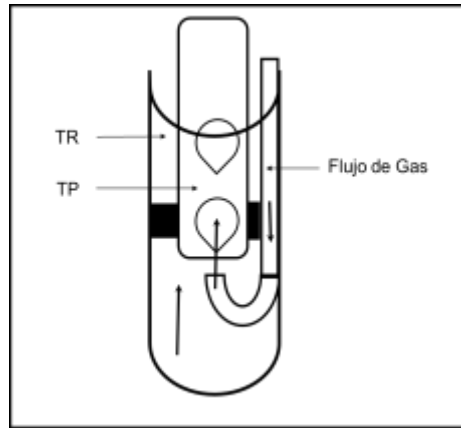


Figura 3.1 Esquema de la primera patente registrada de una válvula para generar Bombeo Neumático (BN) dentro de una tubería de producción (A. Brear); el gas es pasado por una aguja de inyección que conecta con la región anular entre las tuberías de revestimiento (TR) y la de producción (TP) y descarga el gas en la parte baja de la tubería de producción [11].

III.2 Tipos de Bombeo Neumático

Al inicio de la explotación de un yacimiento la producción de los pozos se da sin la necesidad de intervenir el pozo gracias a que la presión es la suficiente para elevar los fluidos del yacimiento hasta la superficie; estos pozos se les conocen como pozos fluyentes. Debido a la explotación de los yamientos durante un cierto periodo de tiempo, es común que los pozos que se encuentran produciendo declinen su producción por causa de la pérdida de presión en el yacimiento [12], para evitar esta caída de producción existen ciertas alternativas como:

- Mantenimiento de presión del yacimiento.
- Suministro de energía al pozo necesaria para fluir.

Cuando la energía no es la suficiente para levantar la columna del fluido del pozo es necesario adicionar un sistema que permita el flujo del fluido del yacimiento a la superficie, la implementación de sistemas artificiales de producción que se enfocan en proporcionar energía adicional al pozo, así como procesos de recuperación secundaria; que es básicamente la inyección de fluidos al yacimiento a través de un pozo inyector y/o la

combinación de éstos para continuar con la explotación de las reservas remanentes del campo.

El propósito del sistema artificial de producción es administrar energía a los fluidos producidos por el yacimiento desde una profundidad determinada y/o mantener una reducción de la presión de fondo fluyendo para que la formación pueda dar el gasto de líquido deseado. Un pozo puede ser capaz de desempeñar esta tarea bajo su propia energía. En su última etapa de su vida productiva, un pozo es capaz de producir solo un porcentaje del fluido deseado. Durante esta etapa de la vida productiva del pozo y particularmente después de la muerte del pozo, un adecuado método de sistema artificial debe ser instalado y así la requerida presión de fondo fluyendo se puede mantener.

El mantenimiento de la requerida presión de fondo fluyendo es lo principal para la designación de la instalación de cualquier sistema artificial de producción; si una reducción predeterminada en la presión puede ser mantenida, el pozo puede producir el fluido requerido independientemente del tipo de sistema artificial de producción instalado [13].

Uno de los grandes problemas para lograr la generación de **BN** es la disposición de un volumen de gas importante, a presiones altas que permitan la apertura y cierre de las válvulas. El Dióxido de Carbono (CO_2) es el gas más utilizado, por poseer la característica de ser altamente compresible, debido a que las fuerzas de atracción entre sus moléculas, lo que justifica su utilidad, además de otras propiedades. El mecanismo de funcionamiento es función de las fuerzas que intervienen en el sistema. En tales condiciones cuanto menor sea la fuerza que acciona el mecanismo de apertura de la válvula será de menor volumen de gas que se requiere para esta acción.

Cuando el yacimiento ha perdido toda la energía productora debido a la baja de presión es necesario recurrir a estos sistemas (**Bombeo Neumático**) para lograr una producción en la superficie. Este puede ser de dos maneras continuo o intermitente, a presiones por arriba de $250 (lb/pg^2)$ para aligerar la columna de fluidos y así permitir el flujo de estos a la superficie.

El gas inyectado reduce la densidad de los fluidos que se encuentran dentro del aparejo, provocando que la presión ejercida por la carga de los fluidos disminuya, aprovechando además la expansión del gas como fuerza principal para elevar los hidrocarburos a la

superficie. Esta reducción en la densidad de la columna hidrostática crea una presión diferencial entre la presión de fondo fluyente (P_{wf}) y la presión de fondo estática (P_{ws}), la diferencia de presiones mejora el flujo de los fluidos hacia el pozo para producir un gasto deseado. En la Figura 1.6 se presenta una representación gráfica de un sistema de Bombeo Neumático (**BN**) con las instalaciones superficiales y subsuperficiales.

III.2.1 Bombeo Neumático Continuo BNC

Como se mencionó antes, se tienen dos tipos de bombeo neumático: el Bombeo Neumático Continuo (**BNC**); que consiste en la inyección de gas a altas presiones de manera continua, puede ser por un solo punto o por varios a través de válvulas colocadas estratégicamente. El gas es inyectado a la presión de apertura de las válvulas operantes, estas válvulas se mantienen abiertas hasta que la presión en el espacio anular es menor a la presión de apertura, lo que causa el cierre de estas.

III.2.2 Bombeo Neumático Intermitente BNI

Por otro lado, el Bombeo Neumático Intermitente (**BNI**), consiste en la inyección de un determinado volumen de gas en forma periódica, creando baches de gas en la tubería de producción que desplazan a los hidrocarburos hasta la superficie. El gas es inyectado desde la superficie hacia a través del espacio anular por medio de un regulador, interruptor o una combinación de ambos, posteriormente el gas es desplazado del espacio anular entra a la tubería de producción por medio de válvulas colocada en el aparejo. El volumen de gas inyectado por periodos regulados es determinado de acuerdo con la cantidad de fluidos que se estén aportando de la formación hacia el pozo.

A diferencia del Bombeo Neumático Continuo, las válvulas no se encuentran todo el tiempo abiertas, éstas abren y cierran periódicamente para inyectar el volumen de gas óptimo y así lograr un eficiente desplazamiento del líquido. Cuando la válvula abre, los fluidos de formación acumulados dentro de la **TP** son elevados a la superficie con un flujo tipo tapón o pistón a causa de la energía del gas inyectado. Sin embargo, debido al fenómeno de

resbalamiento del líquido, sólo una parte del volumen de aceite inicial es recuperado en la superficie, mientras que el resto cae al fondo del pozo integrándose al siguiente bache de aceite de la formación [14]. Figura 3.2

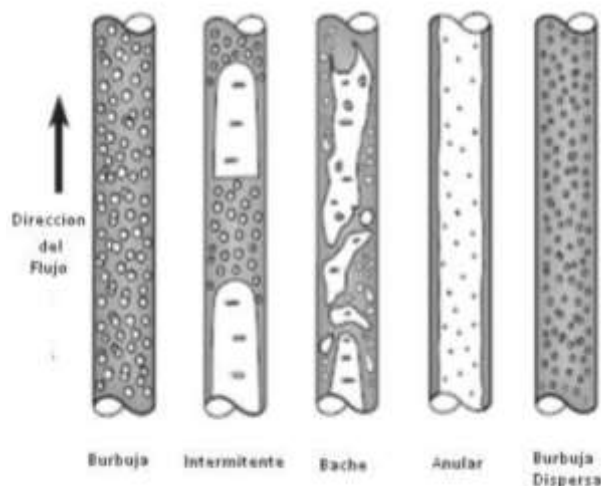


Figura 3.2 Tipos de flujo en una tubería.

Muchos factores deben ser considerados en el diseño de una instalación de bombeo neumático. Uno de estos primeros factores es determinar si el pozo podría ser operado en flujo continuo o intermitente. Otro factor que influye es el conocimiento de cual tipo de flujo es mejor, este límite presenta muchas dificultades para el diseño de la instalación.

Las válvulas de bombeo neumático que están disponibles son adecuadas tanto para flujo continuo como para flujo intermitente, sin embargo, muchas válvulas pueden ser usadas solo para un tipo de flujo.

El propósito de las válvulas de bombeo neumático es:

- Descargas al fluido del pozo de tal modo que el gas pueda ser inyectado en un punto óptimo de la sarta.
- Controlar el flujo de inyección del gas tanto para la descarga como para la operación.

La localización de las válvulas en la configuración de flujo está influenciada por:

- Disponibilidad de la presión del gas para la descarga.
- La densidad del fluido o gradiente de los fluidos en el pozo o un determinado tiempo de descarga.
- Comportamiento de afluencia al pozo durante el tiempo de descarga.
- La presión a boca de pozo (contrapresión entre el pozo y la central de recolección) que hace posible que los fluidos puedan ser producidos y descargados.
- El nivel de fluido de la tubería de producción (espacio anular) ya sea que el pozo haya sido cargado con fluidos de control o prescindido de él.
- La presión de fondo fluyendo y las características de los fluidos producidos del pozo.

Para el caso del diseño en consideración, se trata de una válvula de inyección de gas para generar Bombeo Neumático Continuo (**BNC**) o Bombeo Neumático Intermitente (**BNI**), ya que el mecanismo de cierre lo genera un polietileno colocado en la salida lateral de la aguja de inyección.

III.3. Diseño de la Válvula Balanceada (VB)

El diseño de la válvula está basado en el dispositivo denominado pivote que permite el inflado y la conservación de la presión en los balones que se utilizan para las prácticas de deportes con las manos o pies; consiste en un cilindro de polietileno de 1.5 (cm) de altura y 0.8 (cm) de diámetro. Por el centro del cilindro tiene una perforación que se encuentra cerrada debido a la fuerza restitutiva del látex y que se abre cuando se pasa por él una válvula de acero en forma de tobera, conformando una especie de sello que impide el contraflujo del gas.

La válvula de acero cilíndrica que funciona como una tobera, el látex tiene la fuerza y longitud necesarias para abrazar el cilindro delgado de la tobera, que penetra el pivote e impide el regreso del aire que entra a presión al interior del balón; la presión con que se

inyecta el aire es mucho mayor que la presión en el interior del balón. Una vez que se consigue la presión requerida se retira la válvula y el látex se cierra herméticamente impidiendo la pérdida de presión en el interior.

Otro dispositivo en el que está basado el diseño de la válvula es el que se utiliza para inflar y mantener la presión en los neumáticos de los autos. El dispositivo es una válvula que se atrapa en el rin mediante una goma: la válvula consta de un gusanillo que se rosca en la misma; el gusanillo tiene un sistema de muelle que se comprime y deja pasar el aire a una cierta presión y para evitar el contraflujo del aire, una vez que se deja de inyectar, tiene un látex cilíndrico que cubre los orificios por donde entra el aire en la llanta. En la Figura 3.3, se presenta un esquema de la válvula y el gusanillo.



Figura 3.3 Esquema de una válvula para el inflado de neumáticos y el gusanillo que se rosca dentro de la válvula, el cilindro de látex es el que impide el contra flujo de gas a través de los orificios de inyección.

Por otro lado, uno de los trabajos que muestra el movimiento de una burbuja de gas por el centro de una tubería flexible es el trabajo de Tao Ye y Joseph L. Bull [19], además describen las fuerzas que genera una burbuja al fluir por el centro del tubo, la manera de determinar la fuerza restitutiva del látex mediante la Ley de Hooke.

La atención se centra en la contribución de la expansión de la burbuja por medio de la suposición de que el fluido está inicialmente en reposo. La velocidad de expansión se compara con la velocidad de onda asociada con el tubo flexible, que se puede considerar que representa un límite superior en la velocidad de flujo de fondo.

Ambos extremos del tubo se abren a los depósitos de líquidos, que están a una presión constante. Consideramos la simetría de ejes respecto a la línea central del tubo cilíndrico y la simetría de izquierda a derecha sobre el centro de la burbuja.

La pared flexible está modelada por elasticidad radial y debido a la condición asimétrica solo se calcula la mitad del eje. El cálculo que puede ser representado por un resorte y la tensión longitudinal de la pared. La inercia de la pared no tiene influencia en el movimiento de la burbuja.

III.4. Diseño de válvula propuesta

El cuerpo de la válvula consiste en un cilindro de acero con un diámetro de 4 (cm) , menor al diámetro interior de la tubería de producción **TP**; los diámetros de estos tipos de tuberías son de $3\text{ a }6\text{ (in)}$. Como el mandril de la válvula va colocado en el interior de la tubería de producción, el diámetro de la válvula debe ser menor para evitar una disminución importante en el diámetro de la **TP** que impida el flujo de fluidos y el taponamiento debido al flujo de parafinas.

Tiene un corte diagonal de tal manera que asemeja una cuña cilíndrica, esto permite el deslizamiento de los fluidos por su superficie, disminuyendo el esfuerzo tangencial de la viscosidad.

En el centro de la parte recta del cilindro tiene una perforación perpendicular a la superficie, en la que se le hizo cuerda interior de 8 (mm) de diámetro en donde se rosca el pivote que tiene la misma cuerda en el exterior.

El pivote es un cilindro sólido de acero, termina en punta en la parte superior y el extremo inferior tiene la rosca exterior que permite roscarlo al cuerpo o mandril de la válvula. Por arriba de la segunda mitad del pivote, medido desde la base circular, tiene una perforación lateral por donde sale el aire y está sellada por el látex que envuelve el perímetro del pivote.

Por el eje longitudinal hasta que interseca con el orificio lateral, justo en el centro del pivote tiene una perforación de 0.2 (cm) , que define el área A_o . Por donde se hace pasar el gas a una presión P_g .

Por su parte el cuerpo de la válvula o mandril tiene un apéndice de 1 (cm) de diámetro y con una longitud ligeramente mayor al espesor de la tubería de producción, perpendicular al lado recto del cilindro, por el eje del apéndice se hizo una perforación de 0.3 (cm) que prolonga por el cuerpo de la válvula hasta intersecar con el orificio perpendicular que rosca con el pivote, y que define A_g , para permitir el paso del gas desde la región anular a la TP .

Por abajo del apéndice tiene una perforación con cuerda de 0.5 (cm) para colocar un tornillo de cuerda corrida, cabeza hexagonal para sujetar la válvula a la TP . En la Figura 3.4 se presenta un esquema de la válvula en cuestión.

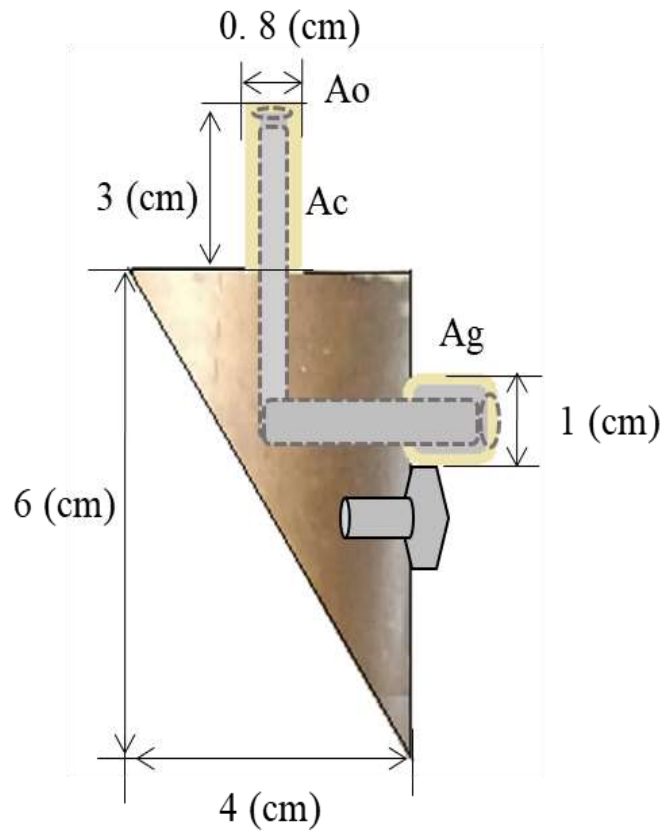


Figura 3.4 Esquema de la válvula para la generación de Bombeo Neumático (BN).

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS REOLÓGICO DE UNA VÁLVULA PARA BN

IV.1 Introducción

El estudio de los principios físicos que regulan el movimiento de los fluidos es lo que se denomina “*reología*”.

Es la parte de la física que estudia la deformación y el flujo de la materia. Es una parte de la mecánica de medios continuos. Una de las metas más importantes en reología es encontrar ecuaciones constitutivas para modelar el comportamiento de los materiales, dichas ecuaciones son, en general, de carácter tensorial.

Las propiedades mecánicas estudiadas por la reología se pueden medir mediante aparatos que permiten someter al material a diferentes tipos de deformaciones controladas y medir los esfuerzos o viceversa. Algunas de las propiedades reológicas más importantes son:

- Viscosidad aparente (relación entre esfuerzo de corte y velocidad de corte).
- Coeficientes de esfuerzos normales.
- Viscosidad compleja (respuesta ante esfuerzos de corte oscilatorio).
- Módulo de almacenamiento y módulo de pérdidas (comportamiento viscoelástico lineal).
- Funciones complejas de viscoelasticidad no lineal.

IV.2 Flujo de fluidos en un Sistema Integral de Producción (SIP)

Para analizar el flujo de fluidos dentro de un sistema integral de producción se realiza un análisis nodal. Este es el estudio de las caídas de presión que ocurren dentro de un sistema integral de producción.

Un análisis nodal es una herramienta importante para la evaluación de un sistema integral de producción ya que analiza el comportamiento de cada elemento que conforma dicho sistema, ayudando a identificar los nodos que presentan problemas. El análisis Nodal puede aplicarse en cualquier tipo de pozos, inyectoros, con un sistema integral de producción instalado, y fluyentes.

Para realizar un análisis nodal es necesario dividir al Sistema Integral de Producción en diferentes nodos, estos nodos analizan la caída de presión en partes específicas del sistema. La aplicación del análisis nodal analiza la capacidad de transporte del sistema y se pueden determinar el diseño de las instalaciones para obtener un gasto idóneo. En la Figura 4.1, se muestra un diagrama con las caídas de presión y los nodos principales dentro de un Sistema integral de producción.

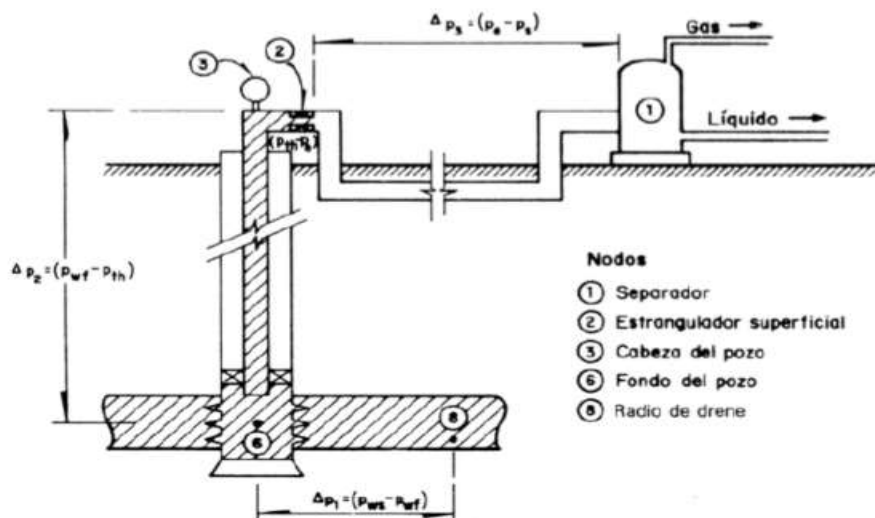


Figura 4.1 Representación de nodos principales que componen un Sistema Integral de Producción (SIP).

Existen tres principales trayectorias de flujo dentro de un sistema integral de producción:

1. Flujo de fluidos del yacimiento al pozo.
2. Flujo de fluidos del fondo del pozo a la superficie.
3. Flujo de fluidos de la cabeza del pozo a la batería de separación y tanque de almacenamiento.

En cada una de estas etapas existe la posibilidad de encontrar diferentes fases de flujo dependiendo de las condiciones de producción y las propiedades de los fluidos por lo que tenemos: flujo monofásico, en el mejor de los casos, bifásico y trifásico principalmente.

Para el flujo del yacimiento al pozo se debe de relacionar el gasto con la caída de presión que existe entre el pozo y el radio de drene del pozo. En esta etapa se tiene una pérdida de energía del 10 al 30% (Beggs, 1991) en el transporte de fluidos. Es muy importante tomar en consideración las propiedades de los fluidos, la saturación fluidos en el medio poroso, las propiedades de la roca, daño de la formación y el mecanismo de empuje dentro del yacimiento. La Ley de Darcy (Ecu. 4.1) es la ecuación más usada en la industria petrolera para predecir el flujo de fluidos a través del medio poroso.

$$q = vA = -\frac{k_a A}{\mu} \frac{dP}{dx} \quad 4.1.$$

Donde:

q = Gasto volumétrico a condiciones de flujo (cm^3/s)

v = La velocidad del flujo (cm/s)

A = Área total transversal de flujo (m^2)

K_a = Coeficiente de Permeabilidad del medio poroso (mD)

μ = Viscosidad del fluido (cP)

dP/dx = Gradiente de presión en la dirección del flujo (atm/cm)

Es importante considerar las restricciones pertinentes que deben tomarse en cuenta para validar la ecuación de Darcy.

- Un medio homogéneo e isotrópico
- Medio poroso saturado de una sola fase
- Viscosidad constante
- Temperatura constante
- Flujo laminar

Para el flujo de fluidos en tuberías horizontales, inclinadas y verticales es necesario realizar un balance de energías del sistema. La Ecu. 4.2 es lo que se conoce como el primer principio de termodinámica o principio de conservación de la energía.

$$\Delta E + \Delta W_s = \Delta W_f \quad 4.2.$$

Donde:

ΔE = Es la energía total del sistema por unidad de masa, que corresponde a la suma de las energías de expansión, potencial y cinética.

ΔW_s = Es la adición o pérdida de energía mecánica en el sistema debido a una bomba o turbina.

ΔW_f = Es la pérdida de energía debido a la fricción del flujo con las paredes internas de la tubería.

Las mayores pérdidas de presión se obtienen en la segunda etapa de flujo, flujo dentro de la T.P, alrededor del 40-80% (Brown) de la energía total del sistema se pierde en esta etapa. Esta caída de presión tan grande se debe a tres factores caída de presión por fricción, por aceleración y por elevación. Siendo esta última la que más afecta en el caso de tuberías

verticales por la columna de fluidos, ya que va realizando una contrapresión en el fondo del pozo y provoca la disminución de la potencia de flujo.

La segunda caída de presión más importante es provocada por la fricción ya que es una restricción que está presente entre los fluidos y la tubería, ésta depende en gran medida de las propiedades de los fluidos.

El gradiente de presión por aceleración es la caída de presión que se origina por las diferencias de velocidades que existen entre las partículas de las fases del fluido. Sin embargo, este parámetro no se considera dentro de los cálculos debido a que las pérdidas de presión son prácticamente despreciables en comparación con los gradientes anteriores [10].

IV.3 Análisis de fuerzas en equilibrio

Para contribuir a mejorar las condiciones de flujo en la segunda caída de presión más importante es necesario la disposición dispositivos mecánicos en la tubería de producción que permitan administrar la energía suficiente para lograr que los fluidos lleguen hasta la superficie.

Es claro que los dispositivos más importantes en el *BN* son las válvulas y su mecanismo de funcionamiento; La apertura y cierre de operación:

a) La presión de apertura se define entonces como la presión en la TR requerida para abrir la válvula bajo condiciones de operación.

Para determinar la presión de apertura es necesario realizar un balance de todas fuerzas que están actuando sobre la válvula cerrada instantes antes de su apertura. En este instante, las fuerzas ejercidas para cerrar la válvula son iguales a las fuerzas ejercidas para abrirla. Por lo que puede establecerse la siguiente ecuación.

$$\textit{Suma de fuerzas de apertura} = \textit{Suma de fuerzas de cierre}$$

Llamando ΣF_o a la suma de fuerzas de apertura, ΣF_c a la suma de fuerzas de cierre de la válvula y sabiendo que $F = PA$:

$$F_o = P_c(A_b - A_p) + P_T A_p \quad 4.3.$$

$$F_c = P_d A_b \quad 4.4.$$

Donde:

$P_c = P_R =$ Presión en la TR.

$A_b =$ Área del fuelle.

$A_p =$ Área de cierre o paso de gas o aceite.

$A_d =$ Área del domo.

$P_t =$ Presión en la TP.

$P_d =$ Presión del domo.

En la Figura 4.2 se tiene un esquema en donde se puede identificar cada una de las partes elementales que componen una válvula.

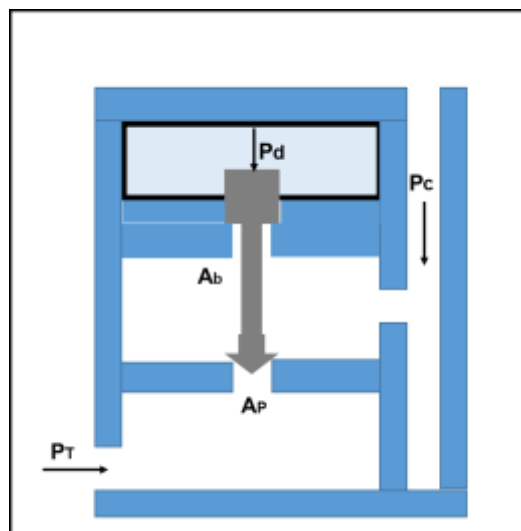


Figura 4.2 Esquema con las componentes fundamentales de una válvula.

Igualando las Ecu. 4.3 y 4.4, y dividiendo entre el área del pistón.

$$P_c = \left[1 - \left(\frac{A_p}{A_b} \right) \right] = P_d - P_T \left(\frac{A_p}{A_b} \right) \quad 4.5.$$

Si $R = \frac{A_p}{A_b}$ La presión de cierre es:

$$P_c = \frac{P_d - P_T R}{1 - R} \quad 4.6.$$

b) La presión de cierre bajo condiciones de operación.

La presión de cierre se define como la presión en la TR requerida para cerrar la válvula actuando bajo condiciones de operación.

Para determinar la presión de cierre se realiza un balance de fuerzas similar al hecho para la presión de apertura; un balance de las fuerzas actuando sobre la válvula abierta un instante antes de su cierre. Tanto las áreas como las presiones son idénticas para esta válvula y la anterior, excepto que ahora la presión bajo la válvula es afectada por la presión en la TR y no por la presión en la TP.

Desarrollándose la siguiente ecuación:

Suma de fuerzas de apertura = Suma de fuerzas de cierre

Nuevamente igualando las ecuaciones 4.3 y 4.4, y haciendo $P_c = P_{VC}$, $A_p = A_b$

$$P_{VC}(A_b - A_p) + P_{VC}A_p = P_d A_b \quad 4.7.$$

$$P_{VC} = P_d \quad 4.8.$$

La Ec. 4.8 dice que la presión en la Tubería de Revestimiento **TR** es igual a la presión del domo; presión necesaria para cerrar la válvula.

Existen otros tipos de válvulas como la reguladora de presión o de flujo continuo. Requiere de un aumento en la presión en el espacio anular para abrir y un aumento en la Tubería de Producción **TP** para cerrar.

Las válvulas operadas por fluidos de la formación son un 50 a 100% sensible a la presión en la TP en la posición cerrada y 100% sensible a la presión en la TP en la posición abierta (Capítulo 2). Esta válvula requiere un incremento en la presión de la TP para abrir y una reducción en la presión de la TP para lograr el cierre.

$$F_C = P_{st}(A_b - A_v) + P_{bT}A_b \quad 4.9.$$

$$F_O = P_T A_b \quad 4.10.$$

$$F_O = P_T(A_b - A_v) + P_g A_v \quad 4.11.$$

$$P_T = \frac{P_{bT} - P_g R}{1 - R} + P_{ST} \quad 4.12.$$

$$F_C = P_{bT}A_b + P_{ST}(1 - R) \quad 4.13.$$

$$P_T = P_{VC} = P_{bT} + P_{ST}(1 - R) \quad 4.14.$$

La Ec. 4.14 establece que la presión en la TP es la misma que en la TR.

Otro tipo de válvulas utilizadas en el proceso de **BN** son las balanceadas, se caracterizan por no estar influenciadas por la presión en la TP, independientemente de que se encuentren en posición abierta o cerrada. La presión por la que están influenciadas es la presión en la TR, esta actúa todo el tiempo en el área del fuelle, significa que la válvula abre y cierra a la misma presión conocida como presión del domo P_d . La Figura. 4.3 es un esquema de una válvula balanceada en las posiciones abierta y cerrada.

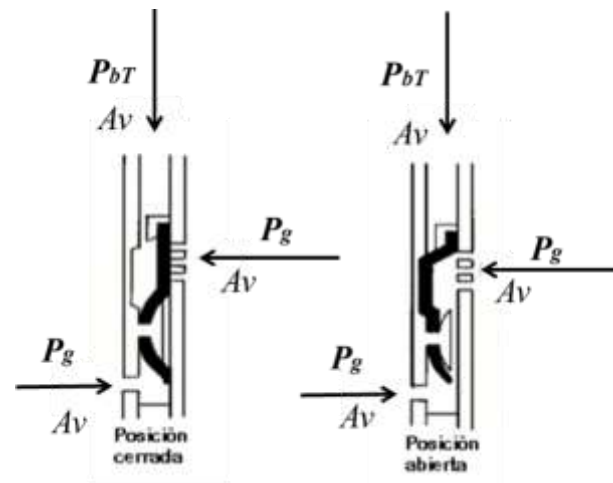


Figura 4.3 Válvula balanceada en las posiciones de apertura y cierre. Las áreas correspondientes a cada una de las presiones señaladas son iguales [10].

Para obtener una ecuación tanto de apertura y de cierre para las válvulas balanceadas es necesario hacer un balance de fuerzas igual que con las válvulas desbalanceadas.

Haciendo la siguiente consideración:

P_{vo} = Presión de la válvula abierta.

P_{vc} = Presión de la válvula cerrada

P_{bT} = Presión en la TR

$P_{vo} = P_{bT}$, $P_{vc} = P_{bT}$, $P_g = P_{vc}$

Para la válvula cerrada en condición inminente de apertura. Igualando las fuerzas de cierre con las de apertura:

$$F_c = P_g A_v = F_o = P_{sT} A_v + P_T A_v$$

Donde:

$P_g =$ Presión de gas en la TR

$P_{sT} =$ Presión debida al muelle del resorte

$$P_g = P_{vo} = P_{sT} + P_T \quad 4.15.$$

Para la válvula abierta en condición inminente de cerrar:

$$P_g = P_{vc} = P_{sT} + P_T \quad 4.16.$$

Evidentemente las ecuaciones 4.15 y 4.16 son iguales; así, las condiciones de presión de apertura y cierre de la válvula son las mismas.

IV.4 Análisis de fuerzas del diseño de válvula propuesto

Las fuerzas involucradas en la apertura de la válvula son:

$$F_o = P_g A_o + F_k \quad 4.17.$$

Las fuerzas involucradas en el cierre de la válvula son:

$$F_c = P_h A_c + F_k A_c \quad 4.18.$$

Donde:

$A_o = \text{Área de salida del gas}$

$A_c = \text{Área lateral del látex que cubre al cilindro de inyección}$

$P_h = \text{Presión hidrostática a la profundidad } h_c$

$F_k = \text{Fuerza de restitución elástica del látex}$

En la Figura 4.4 se presenta una imagen con los elementos que constituyen el diseño de la válvula que se propone.

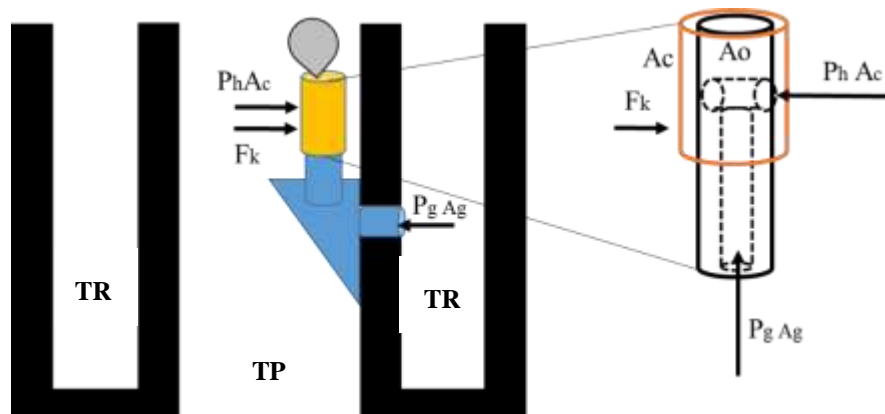


Figura 4.4 Dibujo del diseño de válvula para generar BN propuesto.

Igualando las Ecu. 4.17 y 4.18 y haciendo $P_g = P_{vo}$

$$P_g A_g - F_k = P_h A_c + F_k A_o \quad 4.19.$$

Como $F_k = kx$, y $x = 0$, *ya que el látex no esta estirado*. Por lo tanto, el segundo término del segundo miembro de la Ecu. 4.21 es igual a cero.

Despejando P_g y haciendo $R = \frac{A_o}{A_g}$, $\Phi = \frac{A_c}{A_g}$

$$P_{ov} = P_g = \Phi P_h + R F_k \quad 4.20.$$

La ecuación 4.20 es la presión de apertura de la válvula. $A_c > A_g$. Por lo que $\Phi > 1$, Así que la fuerza debido a la presión hidrostática se incrementa en más de una unidad. Por otro lado $R < 1$, así la fuerza elástica en la dirección horizontal, debido al látex disminuye.

La ecuación de cierre de la válvula queda definida de la siguiente manera:

$$P_{cv} = P_g = \Phi P_h \quad 4.21.$$

Esta última ecuación nos indica que cualquier disminución en la presión de gas en la región anular ocasiona el cierre de la válvula.

CAPÍTULO V

MODELO EXPERIMENTAL

V.1 Análisis dimensional

El análisis dimensional es una herramienta conceptual utilizada en la física, química y la ingeniería que consiste en encontrar una relación cuantificable entre los parámetros que intervienen en un fenómeno físico debe ser dimensionalmente homogénea [17].

Los parámetros adimensionales nos permiten utilizar los resultados obtenidos en condiciones limitadas a situaciones en que se tengan diferentes dimensiones geométricas, ayuda a construir hipótesis razonables y a generalizar los resultados experimentales.

La experimentación está basada en fenómenos físicos llevados a una escala menor y si encontramos relaciones geométricas y de fuerza entre el modelo y el prototipo, entonces podemos decir que la solución adimensional resultante resultará válida [15]. En resumen, el Análisis dimensional se destaca por las siguientes funciones:

- Complementar el análisis matemático con la experimentación para la solución de problemas reales complejos.
- Destaca los aspectos esenciales agrupando convenientemente las variables que intervienen logrando así reducir el costo del experimento.
- Relaciona las magnitudes de las variables del experimento a diferentes escalas.

V.1.1. Teorema π de Buckingham

Para realizar un correcto Análisis dimensional el primer paso que debemos realizar es ver la dependencia e independencia de las variables, posteriormente se logra establecer una relación que nos dice que sólo puede existir una variable dependiente y su comportamiento tratará de explicarse en función de los parámetros independientes.

El teorema de π Buckingham demuestra que el número de parámetros iniciales contemplados puede reducirse al considerar la idea de homogeneidad dimensional.

V.1.2. Similitud

En el contexto del análisis dimensional la palabra similitud permite establecer una mejor representación de un fenómeno físico respecto al modelo experimental de tal manera que se tengan las condiciones más cercanas entre sí, con el fin de poder aplicarlas a otras situaciones de la misma índole.

Existen tres similitudes a cumplir las cuales son:

V.1.2.1. Similitud geométrica

La proporción de todas las longitudes correspondientes deben ser las mismas para todos.

V.1.2.2. Similitud cinemática

Si partículas homólogas llegan a puntos y tiempos homólogos. Esta similitud obliga a ambos a tener una escala de líneas y de tiempos. Eso tiene como resultante que se tenga una escala única de velocidades y dado que existe una escala de tiempo deriva a que se tenga una escala de aceleraciones.

V.1.2.3. Similitud dinámica

El estudio de movimiento de fluidos dinámicamente semejantes constituye las bases para la teoría de modelos. Partiendo de esto decimos que para que dos sistemas con fronteras geoméricamente semejantes tengan configuraciones de flujo geoméricamente semejantes en tiempos correspondientes.

Las fuerzas que actúan sobre una partícula de fluido a través de una tubería son debidas a la presión, la viscosidad, la gravedad, la compresibilidad y la tensión superficial.

V.1.3. Números adimensionales

Existe una gran variedad de número adimensionales que dependiendo de las situaciones de flujo que estén presentes; son de gran importancia para interpretar los resultados del modelo experimental.

Los números adimensionales pueden considerarse como el cociente de dos fuerzas que actúan en el fluido.

V.1.3.1. Número de Euler (Eu)

Es la relación que existe entre la fuerza de presión y la fuerza de inercia, se utiliza en situaciones donde la caída de presión del flujo es significativa. En ensayos prácticos se utiliza normalmente el coeficiente de presión, que es igual al doble del número de Euler.

$$CP = \frac{\text{Fuerzas de presión}}{\text{Fuerzas de inercia}} = \frac{\Delta P l^2}{\frac{\rho l^2 v^2}{2}} = \frac{2 * \Delta P}{\rho v^2}$$

V.1.3.2. Número de Reynolds (Re)

Se utiliza cuando el flujo es influenciado por efectos viscosos y se define como la relación de las fuerzas de inercia entre las fuerzas viscosas. Un valor crítico permite distinguir entre un régimen laminar y uno turbulento.

$$Re = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{\rho l^2 v^2}{\mu l v} = \frac{\rho l v}{\mu}$$

V.1.3.3. Número de Froude (Fr)

Se define como la relación de las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad que actúan sobre un fluido, es utilizado cuando el flujo es influenciado por la gravedad.

$$Fr = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas de gravedad}} = \frac{\rho l^2 v^2}{\rho l^3 g} = \frac{v^2}{lg}$$

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{lg}}$$

V.1.3.4. Número de Weber (We)

Se define como la relación de las fuerzas de inercia y las fuerzas de tensión superficial que actúan sobre un fluido. Aparece en situaciones donde la tensión superficial interesa en condiciones dinámicas.

$$We = \frac{\text{Fuerza de inercia}}{\text{Fuerza de tensión superficial}} = \frac{\rho l^2 v^2}{\sigma l} = \frac{\rho l v^2}{\sigma}$$

V.1.4. Leyes de semejanza

Cuando hablamos de similitud dinámica entre un modelo y un prototipo, se presenta cuando las fuerzas generadas en el interior del fluido en puntos homólogos están relacionadas entre sí y además es constante para todas sus fuerzas.

V.1.4.1. Condición de Froude

Rige los fluidos en los cuales predomina la fuerza de gravedad y se desprecian los efectos viscosos.

V.1.4.2. Condición de Reynolds

Es cuando la viscosidad gobierna al flujo o interviene de forma preponderante en el fenómeno entre el modelo físico y el modelo experimental [9].

V.2 Proceso experimental

Con los conceptos vistos en los capítulos anteriores, podemos pasar al *método científico*. Este proceso se origina con el planteamiento del problema, que en nuestro caso será el siguiente.

“Análisis reológico de una válvula balanceada para generar bombeo neumático elaborada en el laboratorio de mecánica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM”

El segundo punto es el estado del arte, del cual se habla en los capítulos anteriores:

- I. Antecedentes.**
- II. Clasificación y funcionamiento de válvulas para Bombeo Neumático.**
- III. Diseño y construcción de una válvula para BN.**
- IV. Análisis reológico de una válvula para BN.**

El proceso experimental que se llevó a cabo para poner a prueba el funcionamiento del diseño propuesto de la válvula balanceada consta de un sistema de inyección de aire, dos tuberías acrílicas transparentes de diferentes diámetros (2.54 cm y 5.08 cm) y 50 cm de longitud, representando así la tubería de producción TP y La tubería de revestimiento TR respectivamente, tal como se muestra en la figura 5.1. El aire es inyectado al pozo a través de la válvula diseñada a diferentes presiones. Los patrones de flujo observados fueron: burbuja, bache, y niebla. Así mismo, se realizó el cálculo de la caída de presión con las correlaciones de Beggs and Brill y se compararon con los resultados experimentales obtenidos de la visualización.

En la Figura 5.1, se representa una instalación de Bombeo Neumático, las partes que lo integran son las siguientes:

1. Manómetro.
2. Separador.
3. Punto de inyección de gas.
4. Línea de descarga.
5. Válvula.
6. Tanque de Almacenamiento.

Tomando en cuenta que el fenómeno de estudio lo conforma un flujo de líquido al cual se le está inyectando gas a través de una válvula, donde los parámetros que intervienen son la velocidad (\mathbf{u}), la densidad ($\mathbf{\rho}$), la caída de presión ($\mathbf{\Delta P}$), la gravedad (\mathbf{g}), la viscosidad ($\mathbf{\mu}$), la longitud (\mathbf{l}), la rugosidad ($\mathbf{\epsilon}$), el diámetro (\mathbf{D}), la constante elástica del resorte (\mathbf{F}) y la tensión superficial ($\mathbf{\sigma}$).

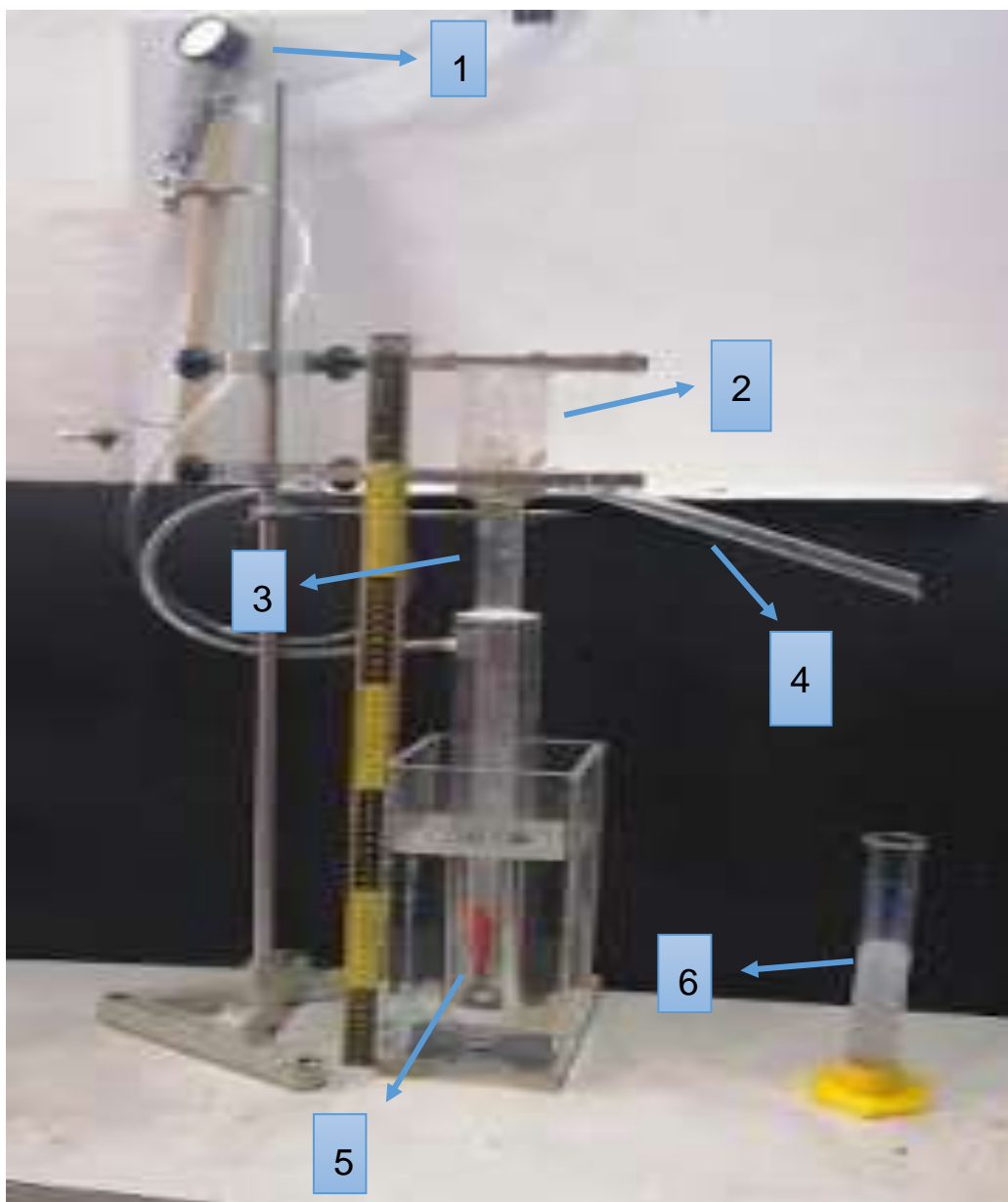


Figura 5.1 Modelo experimental de una instalación de Bombeo Neumático.

V.3 Análisis dimensional del modelo experimental

Para realizar el análisis dimensional de nuestro sistema, emplearemos el *Teorema de Buckingham*, comenzando por la fase líquida:

$$(\Delta P, \rho_L, \mu_L, v_L, g, l, \varepsilon, D, \theta) = 0$$

Como en la caída de presión, se encuentran tres dimensiones implicadas, seleccionamos tres variables repetitivas, entre las cuales se encuentran la densidad, la longitud y la velocidad.

$$\pi = 8 - 3 = 5$$

Por lo tanto, se tienen cinco parámetros adimensionales independientes *PAI*.

$$\pi_1 = \rho_L^{x_1} v_L^{y_1} l^{z_1} \Delta P \qquad \pi_2 = \rho_L^{x_2} v_L^{y_2} l^{z_2} \mu_L$$

$$\pi_3 = \rho_L^{x_3} v_L^{y_3} l^{z_3} g \qquad \pi_4 = \rho_L^{x_4} v_L^{y_4} l^{z_4} \varepsilon$$

$$\pi_5 = \rho_L^{x_5} v_L^{y_5} l^{z_5} D$$

Posteriormente, para cada parámetro se cambian las magnitudes a sus respectivas dimensiones para encontrar los valores de x_1, y_1 y z_1 y finalmente sustituimos los valores en las ecuaciones, de tal modo que se obtiene lo siguiente:

$$\pi_1 = \rho_L^{-1} v_L^{-2} l \Delta P = \frac{\Delta P}{v_L^2 \rho_L}$$

$$\pi_2 = \rho_L^{-1} v_L^{-1} l^{-1} \mu_L = \frac{\mu_L}{\rho_L v_L l}$$

$$\pi_3 = \rho_L^0 v_L^{-2} l^1 g = \frac{g_L}{v_L^2}$$

$$\pi_4 = \rho^0 v_L^0 l^{-1} \varepsilon = \frac{\varepsilon}{l}$$

$$\pi_5 = \rho_L^0 v_L^0 l^{-1} D = \frac{D}{l}$$

Las ventajas que ofrece este Teorema es que nos podemos valer de las herramientas algebraicas de tal forma que los cocientes se asemejen a los números adimensionales aplicados en la Mecánica de fluidos. Por lo tanto, de las cinco expresiones obtenidas, vemos que se encuentra el Número de Euler (π_1), el número de Reynolds (π_2), el número de Froude (π_3).

$$\pi_1 = \frac{\Delta P}{V_L^2 \rho L} = \text{Número de Euler}$$

$$\pi_2 = \frac{\mu_L \rho L l}{\mu_L} = \text{Número de Reynolds}$$

$$\pi_3 = \frac{v_L}{\sqrt{gl}} = \text{Número de Froude}$$

De manera análoga empleamos la misma metodología para la fase gaseosa, agregando dos nuevas variables, la tensión superficial y la constante elástica del resorte. Por lo que se tiene:

$$(\Delta P, \rho_G, \mu_G, v_G, g, l, \varepsilon, D, \theta, F, \sigma) = 0$$

Igual que en la fase líquida, seleccionamos 3 variables repetitivas, las cuales son la densidad, la longitud y la velocidad.

$$\pi = 11 - 3 = 8$$

Por lo tanto, se tienen ocho parámetros adimensionales independientes PAI.

$$\pi_1 = \rho_g^{x^1} v_g^{y^1} l^{z^1} \Delta P \quad \pi_2 = \rho_g^{x^2} v_g^{y^2} l^{z^2} \mu_g$$

$$\pi_3 = \rho_g^{x^3} v_g^{y^3} l^{z^3} g \quad \pi_4 = \rho_g^{x^4} v_g^{y^4} l^{z^4} \varepsilon$$

$$\pi_5 = \rho_g^{x^5} v_g^{y^5} l^{z^5} D \quad \pi_6 = \rho_g^{x^6} v_g^{y^6} l^{z^6} k$$

$$\pi_7 = \rho_g^{x^7} v_g^{y^7} l^{z^7} \sigma \quad \pi_8 = \rho_g^{x^8} v_g^{y^8} l^{z^8} F$$

Analizando los primeros cinco parámetros, es notable que resultan ser los mismos que en la fase líquida, por lo que los parámetros seis, siete y ocho, quedan de la siguiente manera:

$$\pi_1 = \rho_L^{-1} v_L^{-2} l \Delta P = \frac{\Delta P}{V_L^2 \rho_L}$$

$$\pi_2 = \rho_L^{-1} v_L^{-1} l^{-1} \mu_L = \frac{\mu_L}{\rho_L l}$$

$$\pi_3 = \rho_L^0 v_L^{-2} l^1 g = \frac{g l}{\mu_L^2}$$

$$\pi_4 = \rho_L^0 v_L^0 l^{-1} \varepsilon = \frac{\varepsilon}{l}$$

$$\pi_5 = \rho_L^0 v_L^0 l^{-1} D = \frac{D}{l}$$

$$\pi_6 = \rho_L^{-1} v_L^{-2} l^0 k = \frac{k}{\rho g \mu g^2}$$

$$\pi_7 = \rho_L^{-1} v_L^{-2} l^{-1} \sigma = \frac{\sigma}{\rho g \mu g^2 l}$$

$$\pi_8 = \rho_L^0 v_L^0 l^{-1} F = \frac{F}{\rho g \mu g^2 l}$$

Usando las herramientas algebraicas necesarias para asemejar las expresiones a números adimensionales conocidos en la Mecánica de fluidos, las ecuaciones quedan de la siguiente forma:

$$\pi_1 = \frac{\Delta P}{V_g^2 \rho g} = \text{Número de Euler}$$

$$\pi_2 = \frac{\mu_g \rho g l}{\mu_g} = \text{Número de Reynolds}$$

$$\pi_3 = \frac{v_g}{\sqrt{g l}} = \text{Número de Froude}$$

$$\pi_6 = \frac{v_g}{c} = \text{Número de Mach}$$

$$\pi_7 = \frac{l \rho_g v_g^2}{\sigma} = \text{Número de Weber}$$

$$\pi_8 = \frac{\sigma}{v_g^2 \rho_g} = \text{Número de capilaridad}$$

Para la discretización de los parámetros involucrados en el modelo experimental, consideramos las siguientes premisas:

- 1.- Número de Euler, ya que no se presentan grandes caídas de presión
- 2.- Número de Mach, ya que las velocidades de estudio no son grandes.

Mientras que los números de Weber y de capilaridad son parámetros que gobiernan el crecimiento y desprendimiento de la burbuja.

Por lo que nuestros parámetros más influyentes son:

$$\pi_2 = \frac{\mu_L \rho_L l}{\mu_L} = \text{Número de Reynolds para el líquido}$$

$$\pi_3 = \frac{v_L}{\sqrt{gl}} = \text{Número de Froude para el líquido}$$

$$\pi_2 = \frac{\mu_g \rho_g l}{\mu_g} = \text{Número de Reynolds}$$

$$\pi_3 = \frac{v_g}{\sqrt{gl}} = \text{Número de Froude}$$

V.4 Descripción del modelo experimental

En esta sección hablaremos a detalle sobre los equipos y materiales seleccionados para una mejor medición y apreciación del flujo para un sistema de corriente aire-glicerina.

Se utilizaron dos tubos de acrílico. La Tubería de Producción (TP) tiene un diámetro de 2.54 cm y 50 cm de longitud. La Tubería de Revestimiento (TR) posee un diámetro de 5.08 cm y 40 cm de longitud. El espacio anular se encuentra completamente aislado de los fluidos producidos. Los tubos son colocados dentro de un recipiente de acrílico reciclable con una capacidad máxima de 2.977 L; La forma del recipiente se eligió de esta forma para evitar el efecto de reflexión.

Todo el aparejo lo fijamos en la parte superior con una estructura metálica que cuenta con cuatro abrazaderas para tubos de ensayo para evitar que por las altas presiones el modelo se moviera de su posición original. Junto a la estructura se colocó una cinta métrica para referenciar el nivel inicial del líquido y una vez puesto en funcionamiento el modelo, observar la distancia del levantamiento de este.

En el fondo del recipiente se encuentra marcado el centro, sobre éste se colocó una roseta de acrílico con un arreglo radial para permitir el flujo hacia el interior de la tubería, y finalmente sobre la roseta se colocó el arreglo de tuberías, donde se puede ver que el espacio anular está sellado completamente, se utilizó un pegamento especial para acrílico de color blanco, tal como se puede apreciar en la Fig. 5.2.



Figura 5.2 Ilustración de las partes del modelo experimental que van colocados dentro del recipiente de acrílico.

En la parte superior de la TP se colocó un separador, que comunicado a otro tubo de acrílico de 1.25 cm de diámetro, conducirá la glicerina a una probeta graduada de 100 ml. Todo el sistema está montado sobre una mesa horizontal fija, y de fondo un tablero de 106 cm de largo por 69 cm de ancho y un espesor de 1 cm de color negro que servirá para contrastar de tal manera que permita una mejor visualización del flujo del líquido, ya que, por ser transparentes la glicerina y el tubo de acrílico, no podría ser apreciado fácilmente.

Para el modelo experimental tomamos en cuenta las siguientes consideraciones: Se presenta un flujo bifásico, en un sistema aire-glicerina. La glicerina es suministrada desde el tanque de acrílico reciclable al que se le vertieron 2 L del fluido mencionado.

En la Fig. 5.3 se puede ver la válvula con el diseño propuesto y su ubicación al pie del tubo denominado como TP, que a su vez va cubierta por el látex.



Figura 5.3 Posicionamiento de la válvula diseñada.

El aire se suministró por medio de un compresor del laboratorio de mecánica; que conectado a una manguera de plástico de 0.6 cm de diámetro permitía la inyección del aire por el espacio anular. La manguera de plástico también va conectada a un manómetro, con una escala en (Kg/cm^2) y (PSI), para medir las presiones de inyección.

La visualización de los patrones de flujo fue realizada con una cámara digital de alta velocidad, marca SONY con una velocidad de grabación de 120 cuadros por segundo. La cámara se montó sobre un tripie y se posicionó en la parte frontal del modelo a una distancia fija de 30 cm, para permitirnos una amplia visión verticalmente, incluyendo la válvula, la tubería y el separador.

V.5 Trabajo experimental

Para dar inicio al funcionamiento del modelo experimental, el llenado del recipiente con la glicerina se llevó a cabo de la siguiente forma:

Utilizamos un embudo, el cual se inclinó ligeramente de tal modo que la boquilla quedara en contacto con las paredes y lentamente se fue vertiendo el líquido. De esta forma garantizamos la nula formación de pequeñas burbujas de aire, que pueden entorpecer la visualización del flujo. Tal como lo menciona en un artículo de creación de burbujas, de los autores A. Ortiz y A. Medina.

Como primer paso, se llevó a cabo el llenado del depósito con glicerina, cuyas propiedades son: densidad de $1260 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ y una viscosidad de 1500 (cp), a una temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

El primer experimento que se llevó a cabo fue a una presión de .25 (PSI). Con lo que comprobamos que la apertura de la válvula se puede dar a una baja presión de inyección. Esta presión bastó para abrir la válvula, y elevar la columna del fluido 24 cm, pero no lo suficiente para obtener un gasto de glicerina. La inyección se mantuvo durante 7 minutos y esperamos un lapso de 5 minutos para volver el sistema a un estado estático.

Durante los primeros 3 minutos se observaron pequeñas burbujas de líquido que quedaban atrapadas en la corriente de inyección. A este tipo de flujo se le conoce como flujo burbuja. Después de ese tiempo, el tipo de flujo que se observó fue un tipo bache, apreciándose notablemente la coalición de las burbujas, formando una del tamaño del diámetro la TP, tal como se puede observar en la Fig.5.4.

La burbuja al alcanzar la altura máxima, (hasta los 28 cm) la burbuja reventaba y el líquido que venía siendo empujado por la corriente de gas resbalaba por las paredes de la tubería, dicho fluido era nuevamente elevado por el bache de gas que venía en continuación.

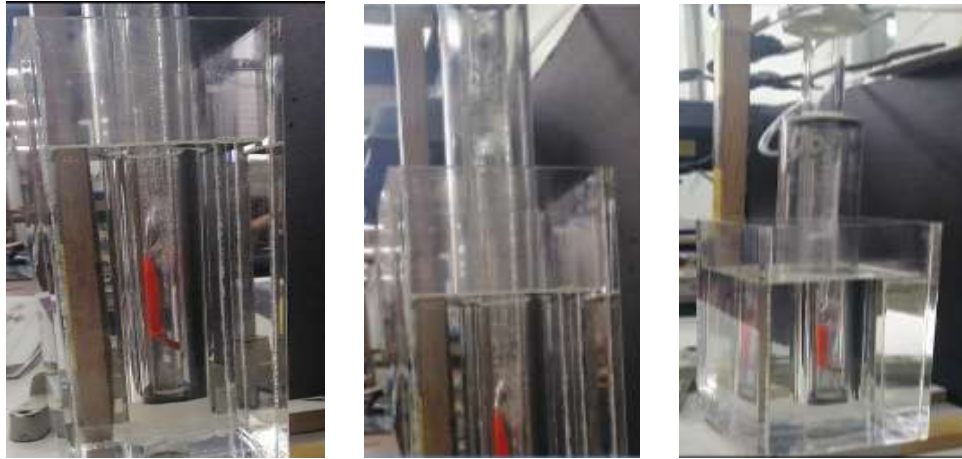


Figura 5.4 Formación y desarrollo del Flujo tipo bache a $.25 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$.

Los datos directamente obtenidos para la fase líquida en este primer experimento son;

- La presión, medida con manómetro,
- El gasto de líquido que es recolectado en la probeta,
- El tiempo que fue medido con un cronómetro,
- La elevación de la columna de líquido medida con la cinta métrica.

Continuando con la fase gaseosa:

- El tiempo de formación de la burbuja lo calculamos de la siguiente manera: Sabemos de antemano que la cámara que usamos es capaz de capturar 120 imágenes por segundo, por lo que, en este primer ensayo, con 6 imágenes, se aprecia la formación de la burbuja hasta el punto de su desprendimiento. Dicho número de imágenes lo determinamos con ayuda del software VideoPad el cual fue de utilidad para calcular el radio y posteriormente el volumen de la burbuja.

Entonces para calcular el tiempo de formación realizamos la siguiente operación.

$$t = \frac{\# \text{ de imágenes}}{120} = [\text{seg}] \quad 5.1$$

- Para el cálculo del volumen de gas, el primer paso fue estimar el radio de la burbuja (consideramos que la burbuja es esférica) el cual resultó ser de 0.3 [cm]. Tomando en cuenta esa geometría, la fórmula utilizada para el cálculo del volumen fue la siguiente:

$$\text{Volumen}_{\text{Burbuja}} = \frac{4}{3} \pi (r^3) \quad 5.2$$

Dado que el resultado se obtiene en [cm³], multiplicamos el resultado por 3.5313x10⁻⁵ para obtener el volumen en [ft³].

- Calculando el gasto, sabemos que:

$$Q = \frac{\text{Volumen}}{\text{Tiempo}} \quad 5.3$$

- Por último, calculamos la velocidad con la siguiente fórmula:

$$v = \frac{\text{Gasto}}{\text{Área}} \quad 5.4$$

El cálculo del área se puede realizar sin ningún problema ya que conocemos el diámetro de la tubería (1 [pg]). Antes de hacer el cálculo del área, convertimos las pulgadas [pg] a pies [ft] para que exista una consistencia en las unidades, y más adelante al calcular las caídas de presión dentro de la tubería con la correlación de Beggs & Brill y las unidades que manejan en el libro *Analysis in pipelines*.

Los resultados obtenidos de las ecuaciones anteriores para este primer experimento se encuentran en la Tabla 5.1.

Líquido					Gas					
Presión [kg/cm ²]	Q _g [bbl/d]	Tiempo (min)	Altura [cm]	V _l [ft/seg]	t [seg]	rad _{burbuja} [cm]	Vol _{burbuja} [ft ³]	Q _g [ft ³ /seg]	V _g [ft/seg]	
.25	0	7	9	0	0,05	0,3	3,9939E-06	0,00008	0,01	

Tabla 5.1 Datos obtenidos del primer experimento a .25 [Kg/cm²]

Antes de empezar el segundo experimento nos dimos a la tarea de observar si durante el tiempo de reposo y por ser un diseño nuevo, si hubiera alguna invasión del fluido al espacio anular, el cual fue nulo; posteriormente comenzamos el segundo experimento aumentando la presión de inyección a .5 [Kg/cm²].



Figura 5.5 Fotografía del flujo bache a .5 [kg/cm²]

A esta presión, la elevación de la columna de líquido fue de 45 cm y en consecuencia comenzó a producir obteniendo un gasto de 10 ml en un tiempo de 10 minutos.

La distribución de las fases dentro de la tubería aún se aprecia con claridad, se observa como los baches de gas van empujando una sección de líquido. A los 22 cm de altura notamos como las burbujas reventaban y a partir de ahí el flujo de aire empujaba gotas de líquido al interior del separador, mientras que el flujo tipo burbuja ya no es tan notorio como en el experimento anterior. Esto puede apreciarse en la Fig. 5.5.

De igual manera para esta presión aplicamos las ecuaciones 5.1 a la 5.4 para obtener los datos mostrados en la Tabla 5.2.

Líquido					Gas				
Presión [kg/cm ²]	Q _L [bbl/d]	Tiempo (min)	Altura [cm]	V _L [ft/seg]	t [seg]	rad _{burbuja} [cm]	Vol _{burbuja} [ft ³]	Q _G [ft ³ /seg]	V _G [ft/seg]
.5	0,00904	10	30	0,000109	0,033	0,4	9,467E-06	0,00115	0,21

Tabla 5.2 Datos obtenidos del segundo experimento a .5 [Kg/cm²]

En el tercer experimento elevamos la inyección de aire .5 [kg/cm²] con respecto a la prueba anterior; marcando en el manómetro una presión de 1 [kg/cm²].

En consecuencia del haber aumentado la cantidad de inyección de gas, logramos observar que a la salida de la válvula se presentan pequeños tapones de gas, los cuales no son por completo del tamaño de la tubería ya que se puede ver que una porción del líquido sigue en contacto con las paredes de la tubería, este comportamiento es apreciable hasta los 26 cm, a partir de esa altura, se pueden observar dos comportamientos referentes a la fase líquida; el primero de ellos es que la burbuja revienta, y el bache que viene detrás empuja hasta el separador una fracción de la fase líquida, el otro comportamiento observado es que el líquido que no logró llegar a la superficie, haciendo que resbale por las paredes de la tubería. A esto podemos decir que se presentan los flujos tipo bache y anular. El comportamiento descrito anteriormente es apreciado en la Fig. 5.6.

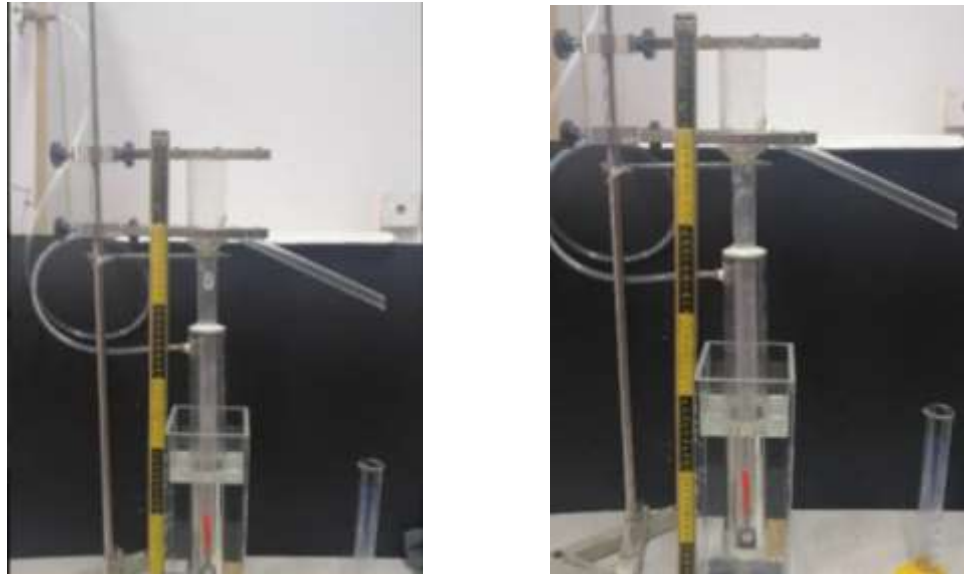


Figura 5.6 Fotografía de los flujos bache y anular a 1 [kg/cm²]

El gasto logrado fue de 50 ml en un tiempo de 4.50 minutos. Los datos obtenidos de esa observación se muestran en la Tabla 5.3.

Líquido					Gas					
Presión [kg/cm ²]	Q _L [bbl/d]	Tiempo (min)	Altura [cm]	V _L [ft/seg]	t [seg]	rad _{burbuja} [cm]	Vol _{burbuja} [ft ³]	Q _G [ft ³ /seg]	V _G [ft/seg]	
1	0,1005	4,5	30	0,001209	0,025	0,4	9,467E-06	0,00549	1,02	

Tabla 5.3 Datos obtenidos del tercer experimento a 1 [Kg/cm²]

En la cuarta prueba incrementamos el gasto de inyección hasta alcanzar una presión de 1.5 [kg/cm²]. En esta prueba obtuvimos un gasto de glicerina de 50 ml en un tiempo de 5 minutos.

A esta presión notamos que la parte superior de los baches comenzaba a deformarse, algunos suelen ser más pequeños que otros, e incluso en la Figura. 5.7, que ilustra la parte media de la tubería puede apreciarse cierta turbulencia causando que la separación entre las fases ya no sea tan notoria; y muy cercano a la válvula, en la parte superior y pasando los 23 cm de altura se observó que la corriente de aire llevaba pequeñas gotas de líquido. A

este comportamiento podemos decir que tenemos la presencia de un Flujo de transición o Churn y un Flujo tipo bache y cercano a la válvula podemos presenciar un flujo anular

Con el gasto de líquido en el tiempo que establecimos y nuevamente auxiliándonos con el software mencionado en el experimento no. 1, determinamos los valores para el gas anotados en la Tabla 5.4.

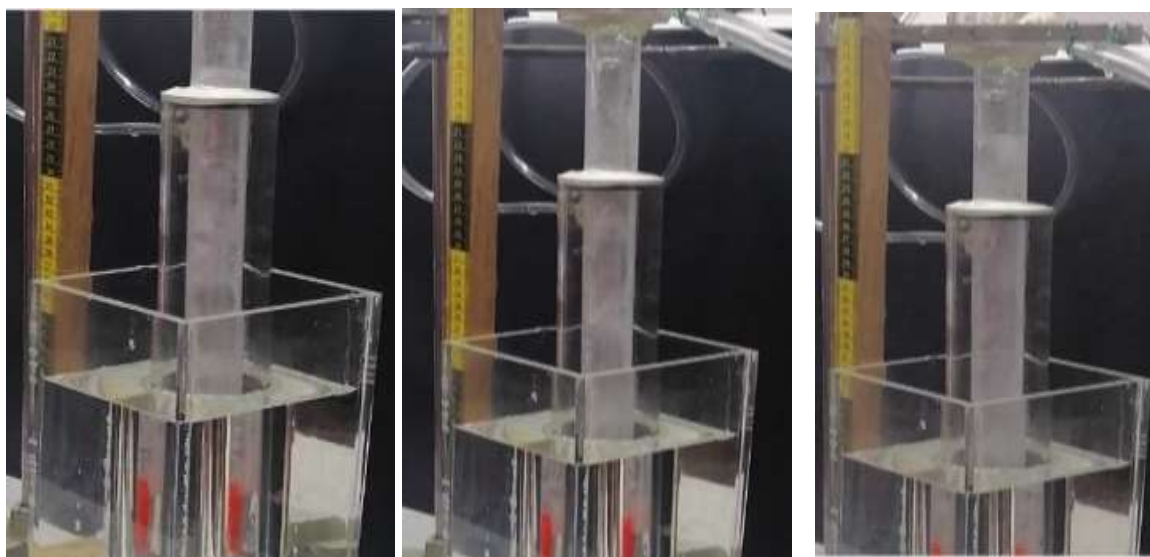


Figura 5.7 Fotografía del flujo de transición y flujo bache a 1.5 [kg/cm²]

Líquido					Gas					
Presión [kg/cm ²]	Q _L [bbl/d]	Tiempo (min)	Altura [cm]	V _L [ft/seg]	t [seg]	rad _{burbuja} [cm]	Vol _{burbuja} [ft ³]	Q _G [ft ³ /seg]	V _G [ft/seg]	
1.5	0,0904	5	30	0,001088	0,02	0,6	3,1951E-05	0,00883	1,63	

Tabla 5.4 Datos obtenidos del cuarto experimento a 1.5 [Kg/cm²]

Para el quinto experimento incrementamos la inyección de aire, registrando en el manómetro una presión de 2 [kg/cm²]; Como primera observación en la fase líquida el comportamiento de turbulencia se hace más presente.

Lo segundo que pudimos apreciar fue que la secuencia de los baches ahora es más continua, reflejándose en la cantidad de líquido que se ubicaba por encima de la cabeza de la burbuja. Las burbujas que no completaron su recorrido hasta el separador reventaban y el flujo que

venía siendo empujado por ese bache era levantado por el bache siguiente, Figura. 5.8, hasta llegar a la superficie y finalmente depositarse en la probeta.

Nuevamente con el software VideoPad, fragmentamos el video para ver en cuántas fotografías se formaba la burbuja hasta el punto de su desprendimiento, y así mismo poder estimar el radio, el volumen de la burbuja y finalmente el volumen de gas. Los datos para el gas y para el líquido se encuentran en la Tabla 5.5.

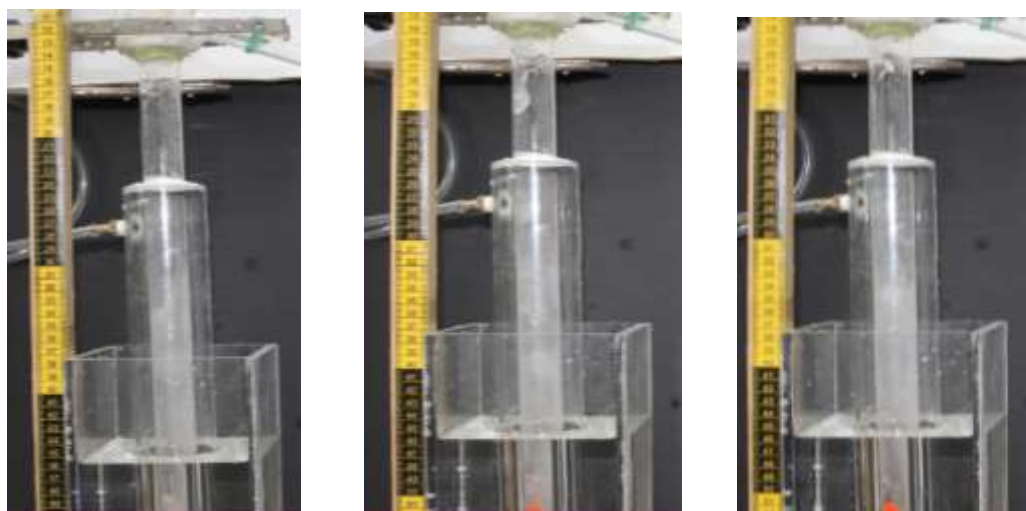


Figura 5.8 Fotografía del flujo de transición y flujo bache a 2 [kg/cm²].

Líquido					Gas					
Presión [kg/cm ²]	Q _l [bbl/d]	Tiempo (min)	Altura [cm]	V _l [ft/seg]	t [seg]	rad _{burbuja} [cm]	Vol _{burbuja} [ft ³]	Q _g [ft ³ /seg]	V _g [ft/seg]	
2	0,1292	3,5	30	0,001555	0,02	1,1	0,00019688	0,01130	2,09	

Tabla 5.5 Datos obtenidos del cuarto experimento a 2 [Kg/cm²]

La última prueba la realizamos a la presión máxima que podía registrar el manómetro, de 3.6 [kg/cm²]. En la Figura 5.9 puede observarse que cercana a la válvula el flujo no tiene un patrón definido, por lo que podemos decir que se trata de un flujo de transición. Y a la altura de 37 cm, los baches comienzan a definirse, y en los espacios que hay entre estos, la glicerina va siendo elevada hasta el separador y finalmente depositada en la probeta.

El tiempo de inyección de aire y la cantidad de glicerina producida se encuentran en la Tabla 5.6.

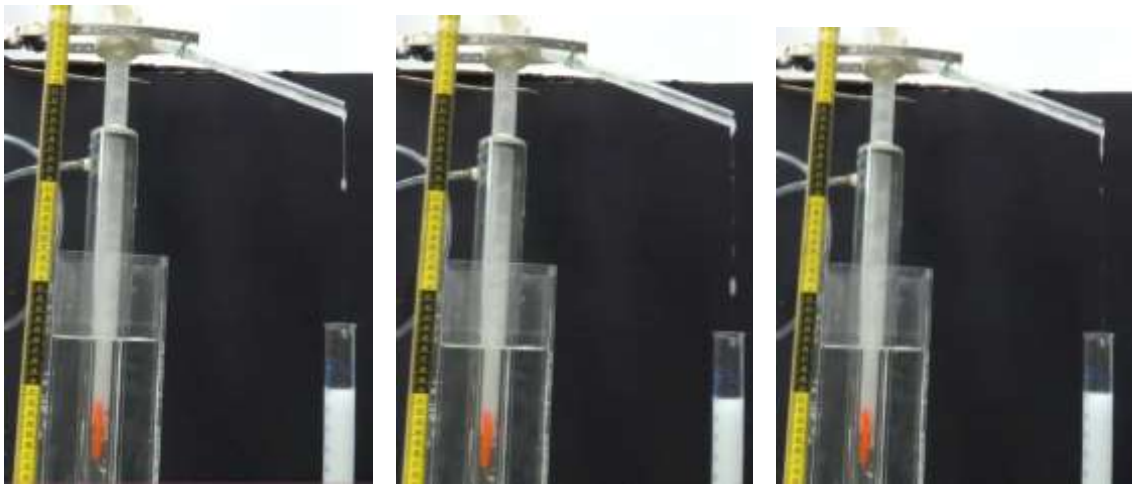


Figura 5.9 Fotografía del flujo de transición y flujo bache a 3.6 [kg/cm²]

Líquido					Gas				
Presión [kg/cm ²]	Q _l [bbl/d]	Tiempo (min)	Altura [cm]	V _l [ft/seg]	t [seg]	rad _{burbuja} [cm]	Vol _{burbuja} [ft ³]	Q _g [ft ³ /seg]	V _g [ft/seg]
3.6	0,46400	1,17	30	0,005587	0,02	2,2	0,00157508	0,02200	4,07

Tabla 5.6 Datos obtenidos del cuarto experimento a 3.6 [Kg/cm²]

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS DE RESULTADOS

La fase del análisis de resultados lo centramos en seis aspectos recabados de la sección experimental; los cuales son:

- La caída de presión dentro de la tubería.
- La constante de deformación del resorte (polietileno).
- El avance del centro de masa (burbuja).
- El Gasto producido con respecto a la presión de inyección.
- La inyección de gas con respecto al Gasto de producción.
- Presión de apertura de una válvula convencional con relación a la presión de apertura de la válvula propuesta.

Antes de proceder al cálculo de la caída de presión en la tubería, vamos a incorporar los datos aportados en cada etapa de la experimentación en una tabla general Tabla 6.1 las tablas 5.1 a la 5.6. Tal como se muestra a continuación.

Líquido							Gas					
Presión [kg/cm ²]	Presión [PSIA]	Q _L [cm ³]	Q _L [bbl/d]	Tiempo [min]	Altura [cm]	VL [ft/seg]	t [seg]	rad _{tubería} [cm]	Vol _{tubería} [ft ³]	Q _g [ft ³ /seg]	V _g [ft/seg]	
.25	3,55	0	0	7	9	0	0,05	0,3	3,99391E-06	7,988E-05	0,0147651	
.5	7,11	10	0,00904	10	30	0,0001087	0,0333333	0,4	9,46704E-06	0,001145	0,2116478	
1	14,22	50	0,1005	4,5	30	0,001209	0,025	0,4	9,46704E-06	0,005494	1,0155396	
1.5	21,33	50	0,0904	5	30	0,0010877	0,0166667	0,6	3,19513E-05	0,008828	1,6318136	
2	28,44	50	0,1292	3,5	30	0,0015548	0,0166667	1,1	0,000196885	0,0113	2,088751	
3.6	51,2	60	0,464	1,17	30	0,0055873	0,0166667	2,2	0,001575079	0,022	4,0665948	

Tabla 6.1 Propiedades de las fases líquida y gaseosa obtenidas de los experimentos.

Con las propiedades, los gastos calculados y las velocidades para cada fase, procedemos a calcular las caídas de presión dentro de la tubería con la correlación de Beggs & Brill.

1.- Calcular $q_o @ c.f = q_o @ c.e * B_o$

2.- Calcular el área del pozo

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

3.- Velocidad de flujo

$$Q = A*v; \quad v = \frac{Q}{A}$$

4.- Gasto de gas

$$q_g @ c.f = [(q_o @ c.e * RGA) - (q_o @ c.e * R_s)] B_g$$

5.- Velocidad del gas

$$Q_g = A*v_g;$$

$$v_g = \frac{Q_g}{A}$$

6.- Fracción volumétrica

$$\lambda_L = \frac{q_L}{q_L + q_g} = \frac{q_L}{q_T}$$

P [PSIA]	λ_L
3.55	0.00000
7.11	0.000513
14.22	0.001189
21.33	0.000666
28.44	0.000744
51.2	0.001372

Tabla 6.2 Fracción volumétrica

7.- Patrón de flujo por el N_{Fr} (Número de Froud)

$$V_m = V_g + V_L \quad N_{Fr} = \frac{Vm^2}{g * \phi}$$

P [PSIA]	Nfr	Vm
3.55	0.0000816	0.015
7.11	0.0167780	0.212
14.22	0.3868060	1.017
21.33	0.9976677	1.633
28.44	1.6348793	2.090
51.2	6.2046947	4.072

Tabla 6.3 Número de Froud y Velocidad de la mezcla

8.- Cálculo de las “L”

$$L_1 = 316 (\lambda_L)^{0.302} = 316 (\lambda_L)^{0.302}$$

$$L_2 = 0.000925 (\lambda_L)^{-2.468} = 0.000925 (\lambda_L)^{-2.468}$$

$$L_3 = 0.1 (\lambda_L)^{-1.452}$$

$$L_4 = 0.5 (\lambda_L)^{-6.738},$$

Una vez calculados los parámetros, procedemos a aplicar las siguientes desigualdades para determinar el patrón de flujo.

Segregado:

$$\lambda_L < 0.01 \text{ y } N_{Fr} < L_1$$

$$\lambda_L \geq 0.01 \text{ y } N_{Fr} < L_2$$

Transitorio:

$$\lambda_L \geq 0.001 \text{ y } L_2 \leq N_{Fr} \leq L_3$$

Intermitente:

$$0.01 \leq \lambda_L < 0.4 \text{ y } L_3 < N_{Fr} \leq L_1$$

ó

$$\lambda_L \geq 0.4 \text{ y } L_3 < N_{Fr} \leq L_4$$

Distribuido:

$$\lambda_L < 0.4 \text{ y } N_{Fr} \geq L_1$$

ó

$$\lambda_L \geq 0.4 \text{ y } N_{Fr} > L_4$$

P [PSIA]	L1	L2	L3	L4	λ	Nfr
3.55					0.00000	0.0000816
7.11	32.08264724	1.21E+05	5.97E+03	7.30E+21	0.000513	0.0167780
14.22	41.34	15294.58	1.77E+03	2.55E+19	0.001189	0.3868060
21.33	34.71	6.39E+04	4.09E+03	1.26E+21	0.000666	0.9976677
28.44	3.59E+01	4.87E+04	3.49E+03	6.01E+20	0.000744	1.6348793
51.2	43.17	10742.31	1.43E+03	9.71E+18	0.001372	6.2046947

Tabla 6.4 Cálculo de las "L", Fracción volumétrica, Número de Froud.

Por lo tanto, las desigualdades que se satisfacen con nuestros valores, Tabla 6.4, son los del flujo segregado. y a partir de este momento seleccionaremos los coeficientes correspondientes a este tipo de flujo Tabla 6.5, para el cálculo del colgamiento.

9.- Determinar el Colgamiento del líquido

$$H_L = \frac{a\lambda_L^b}{N_{Fr}^c}$$

$$\alpha_L(\theta^\circ) > \lambda_L$$

	a	b	c
Segregado	0.98	0.4846	0.0868
Intermitente	0.845	0.5351	0.0173
Distribuido	1.065	0.5824	0.0609

Tabla 6.5 Coeficientes para cada patrón de flujo.

P [PSIA]	Colgamiento (H_L)
3.55	0
7.11	0.035583316
14.22	0.040707616
21.33	0.028314246
28.44	0.028616317
51.2	0.034291809

Tabla 6.6 Colgamiento del líquido para cada prueba de presión.

10.- Colgamiento actual

$$\rho_{o@P,T} = \frac{\rho_{o@c.e} + \rho_{g@c.e} * R_{s@P,T}}{B_{o@P,T}}$$

$$\gamma_{O} = \frac{\rho_{o\text{ muerto}}}{\rho_w} ; \rho_{o\text{ muerto}} = \gamma_o (\rho_w)$$

$$\gamma_g = \frac{\rho_{g@c.e}}{\rho_{aire@c.e}}$$

Para el cálculo de la relación de solubilidad R_s , utilizaremos la correlación de Standing, con el supuesto de que el yacimiento es saturado.

$$R_s = \gamma_g \left[\left(\left(\frac{P}{18.2} \right) + 1.4 \right) 10^{(0.0125 * API - 0.00091 * T)} \right]^{1.2048}$$

P [PSIA]	Rs [ft/bl]
3.55	0.691
7.11	0.775
14.22	0.944
21.33	1.114
28.44	1.283
51.2	1.824

Tabla 6.7 Relación de solubilidad para cada prueba de presión.

$$B_o = 0.9759 + 0.00012 \left[R_s \left(\frac{\gamma_{gd}}{\gamma_o} \right)^{0.05} + 1.25(T) \right]^{1.2}$$

Sustituimos los valores de Rs y Bo en el paso no. 10 para el cálculo del colgamiento. Tabla 6.8

P [PSIA]	Bo
3.55	1.0009
7.11	1.0010
14.22	1.0010
21.33	1.0011
28.44	1.0011
51.2	1.0013

Tabla 6.8 Factor de volumen para cada prueba de presión

P [PSIA]	den.glic@c.f [lbm/ft³]	den.aire@c.f [lbm/ft³]
3.55	78.63	0.354
7.11	78.63	0.709
14.22	78.64	1.417
21.33	78.65	2.126
28.44	78.66	2.834
51.2	78.68	5.103

Tabla 6.9 Densidad del aire y la glicerina para cada prueba de presión a condiciones de flujo.

13.- Cálculo de N_{VL}

$$N_{VL} = 1.938 V_L \left(\frac{\rho_L}{\sigma_{gl}} \right)^{0.25} =$$

P [PSIA]	NVL
3.55	
7.11	4.01962E-05
14.22	0.000446928
21.33	0.000402104
28.44	0.000574818
51.2	0.002065773

Tabla 6.10 Valores de NVL para cada prueba de presión

Calculando C

$$C = (1 - \lambda_L) \ln (e^{\lambda_L^f} * N_{VL}^g * N_{fr}^h) =$$

Patrón de flujo	e	f	g	h
Segregado	0.011	-3.768	3.539	-1.614
Intermitente	2.690	0.3050	-0.4437	0.0978
Distribuido	No corrección: C=0 ; =1			
Todos los patrones	4.700	-0.3692	0.1244	-0.5056

Tabla 6.11 Coeficientes del patrón de flujo.

P [PSIA]	λ_L	N_{VL}	N_{fr}	C
3.55	0		0.0000816	
7.11	0.0005135	4.01962E-05	0.0167780	-5.190677782
14.22	0.001189061	0.000446928	0.3868060	-4.89177549
21.33	0.000666112	0.000402104	0.9976677	-4.614397306
28.44	0.000743837	0.000574818	1.6348793	-4.562454993
51.2	0.001372069	0.002065773	6.2046947	-4.492190553

Tabla 6.12 Cálculo de "C" para cada valor de presión. para cada prueba de presión

Por lo tanto: como $C < 0$; entonces $\Psi=1$

$$\alpha_{L(\theta^\circ)} = \lambda_L(\theta) \Psi$$

$$\alpha_{L(90^\circ)} =$$

Corrección de Payne

Si $\theta^\circ > 0$ ó si θ es positivo

$$\alpha_{L(\theta^\circ)} \text{ corregido} = 0.924 (\alpha_{L(\theta^\circ)} \text{ original})$$

P [PSIA]	Colgamiento $H_{L(90)}$
3.55	
7.11	0.000474474
14.22	0.001098693
21.33	0.000615487
28.44	0.000687306
51.2	0.001267792

Tabla 6.13 Colgamiento del líquido corregido para cada prueba de presión.

Si $\theta^\circ < 0$

$$\alpha_L (\theta^\circ) \text{ corregido} = 0.685 * (\alpha_L (\theta^\circ) \text{ original})$$

Para calcular $\left(\frac{F_{TP}}{f_n}\right) = \theta^{-S}$

$$\text{Donde: } S = \frac{\ln(y)}{-0.0523 + 3.182 \ln(y) - 0.8725 (\ln(y))^2 + 0.01853 (\ln(1.8027))^4}$$

$$y = \frac{\lambda_L}{\alpha_L (\theta^\circ)_{\text{corregido}}^2}$$

$$\left(\frac{F_{TP}}{f_n}\right) = e^S$$

$$F_{TP} = e^S * f_n$$

P [PSIA]	$F_{TP}/f_n = e^S$	Y	S	f_n	F_{TP}
3.55				1.785511346	
7.11	0.930758978	1.18975E-05	-0.071757081	2.576622657	2.39821467
14.22	0.944637853	6.88749E-06	-0.056955364	0.608455348	0.574769954
21.33	0.965629908	1.71483E-06	-0.034975689	0.148286256	0.143189644
28.44	0.970065979	1.07715E-06	-0.030392105	0.097223926	0.094313623
51.2	0.974409603	6.13045E-07	-0.025924308	0.050768358	0.049469176

Tabla 6.14 Coeficientes calculados para estimar el gradiente de presión.

VI.1 Cálculo del gradiente de presión (con resbalamiento)

$$\rho_m = \rho_L (\alpha_L(\theta_{\text{corregido}}) + \rho_g(1 - \alpha_L(\theta^{\circ}_{\text{corregido}})))$$

$$\frac{dP}{dL} = \frac{1}{144} \left[\rho_m \text{sen}\theta \frac{g}{g_c} + \frac{F_{TP} \rho_{ns} v_m^2}{2d g_c} \right]$$

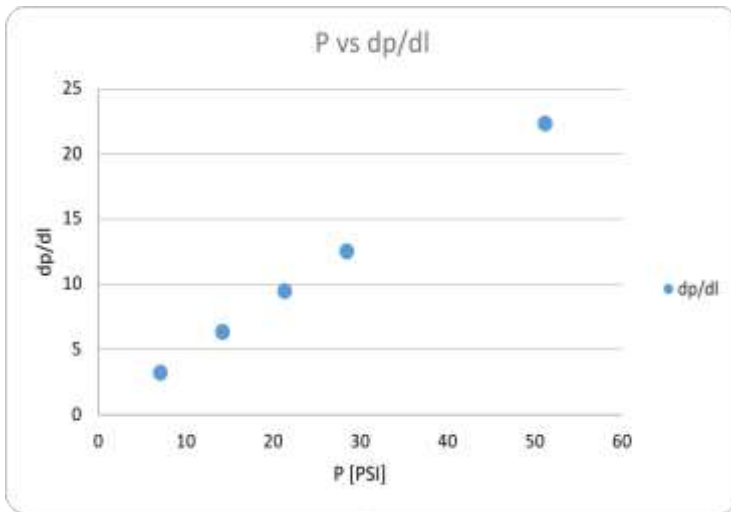


Figura 6.1 Gráfica que representa la caída de presión en la tubería con respecto a cada prueba de presión

P [PSIA]	dp/dl
3.55	
7.11	3.194851865
14.22	6.362062098
21.33	9.458934733
28.44	12.4992331
51.2	22.29304162

Tabla 6.15 Gradiente de presión

La gráfica de la caída de presión dentro de la tubería correspondiente a cada fase del experimento se muestra en la Figura 6.1

VI.1 La constante de deformación del resorte (polietileno).

X (cm)	F (N)
0	0
0,56	0,5
0,98	1
1,45	1,5
1,92	2
2,5	2,5
3,1	3
3,6	3,5
4,2	4
4,8	4,5
5,3	5

Tabla 6.16 Gráfica que representa la deformación del polietileno.

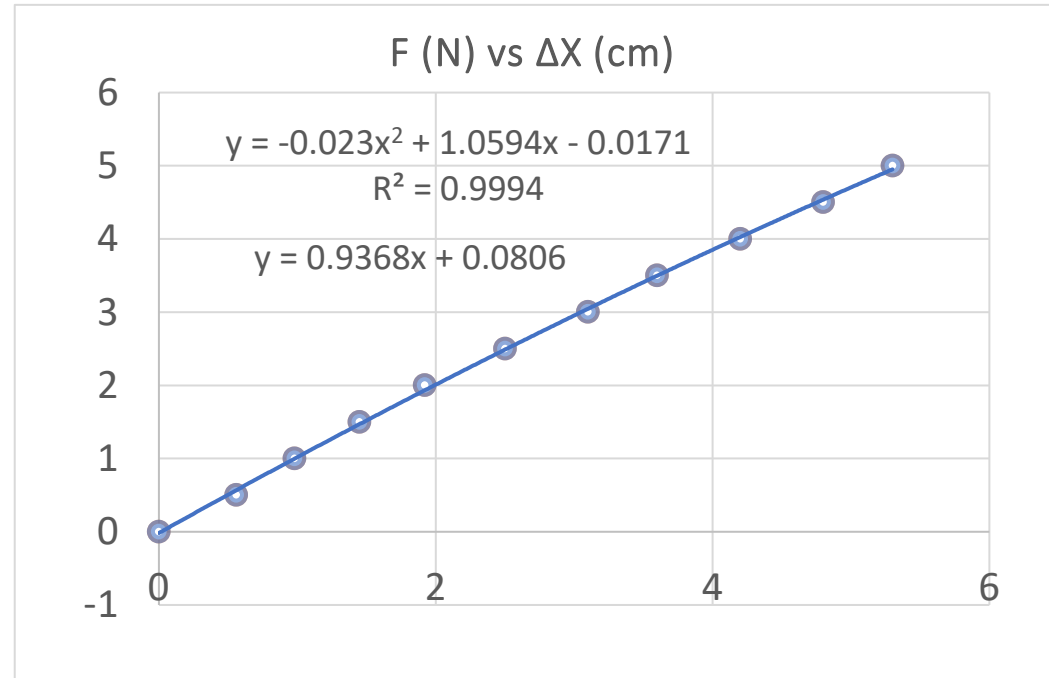


Figura 6.2 Gráfica que representa la deformación del polietileno

VI.2 El avance del centro de masa de la burbuja en su ascenso.



Figura 6.3 Fotografías que ilustran que el centro de masa avanza de manera proporcional durante su ascenso.

VI.3 El Gasto producido con respecto a la presión de inyección.

P	Q
0,25	0
0,5	0,0011
1	0,0055
1,5	0,0088
2	0,0113
3,6	0,022

Tabla 6.17 Presión de inyección con respecto al gasto producido.

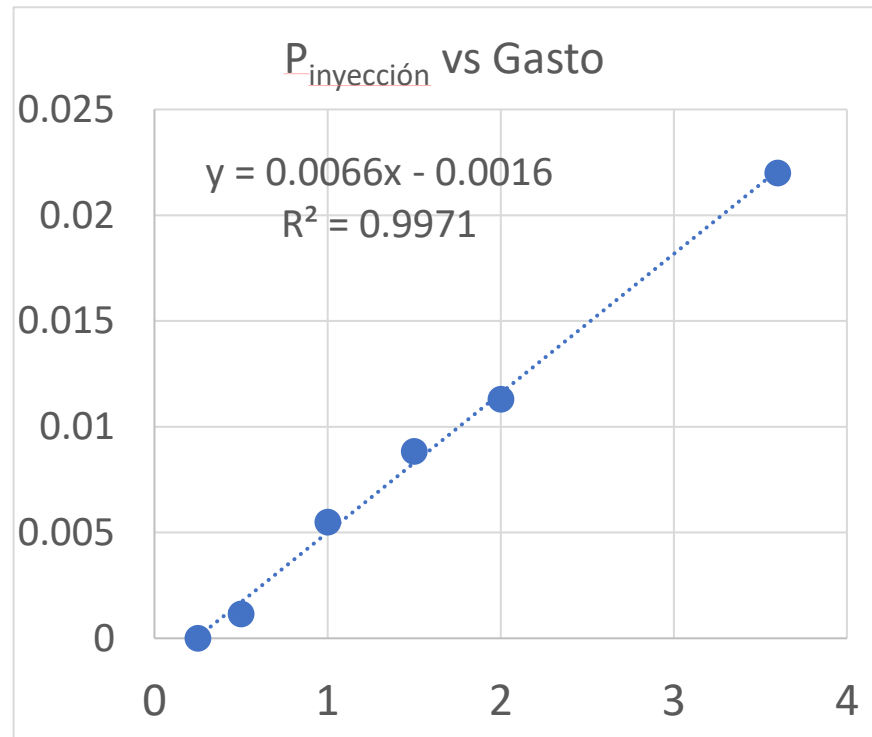


Figura 6.4 Gráfico que ilustra la tendencia de la presión de inyección con respecto al gasto producido.

VI.4 La inyección de gas con respecto al Gasto de producción.

P [PSI]	q_o [ft3/seg]	q_g [ft3/seg]
3,55	0	0,00008
7,11	5,885E-07	0,001145
14,22	6,53889E-06	0,005494
21,33	0,000005885	0,008828
28,44	8,35938E-06	0,0113
51,2	3,01795E-05	0,022

Tabla 6.18 Presión de inyección con respecto al gasto producido.

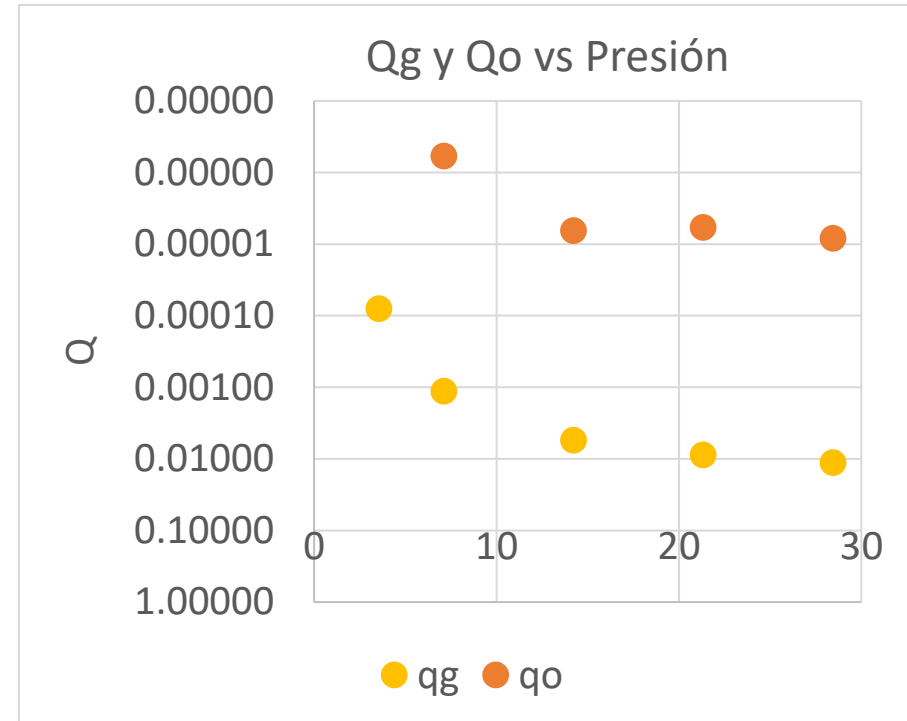


Figura 6.5 Gráfico que ilustra la tendencia del gasto de aire y glicerina con respecto a la presión de inyección.

VI.5 Presión de apertura

Válvula convencional:

$$P_{DOM} = Ph \dots (\text{cerrada})$$

$$Pg > P_{DOM} \dots (\text{apertura})$$

$$Pg > Ph + P_{DOM}$$

$$Pg > 2Ph$$

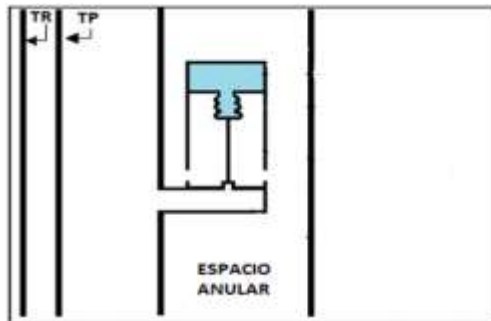


Figura 6.6 Fuerzas de apertura y cierre de una válvula convencional

Válvula propuesta:

$$Pg = Ph \dots (\text{cerrada})$$

En términos de fuerzas

$$P = F_* A ; F = Pg * Ag$$

$$Pg = Ph + Fk$$

$$Pg * Ag = \gamma hA + k\delta$$

La ecuación de la recta del gráfico F (N) vs ΔX (cm)

$$y = 0.9368x + 0.0806$$

$$Pg > Fk + Ph$$

$$Pg \sim 1.2 Ph$$

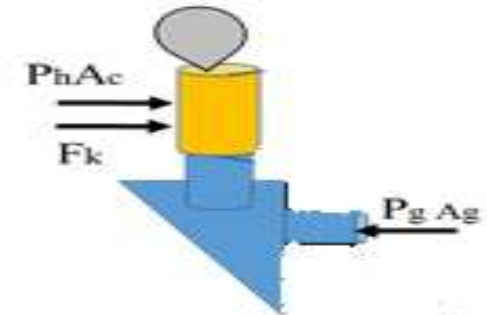


Figura 6.7 Fuerzas de apertura y cierre del diseño propuesto de la válvula

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES

Durante el desarrollo de la actividad experimental del trabajo fue posible establecer que nuestros objetivos planteados al inicio del trabajo se cumplieron; no se tuvo invasión de fluido a la región anular comprendida entre la tubería de revestimiento y la tubería de producción, que causara un taponamiento de la válvula.

De acuerdo con la reología estudiada, la presión para lograr la apertura de la válvula diseñada es menor que la presión requerida a una válvula convencional, ya que la fuerza a vencer se reduce a menos de la mitad de acuerdo con la ley de Hooke y la presión hidrostática sobre el cabezal de la válvula.

Las hipótesis que nos planteamos al inicio del trabajo concordaron con los resultados obtenidos en el desarrollo de los experimentos.

La construcción de un modelo a escala de una instalación de Bombeo Neumático (**BN**) nos permitió visualizar los patrones de flujo que ocurren dentro de la Tubería de Producción (**TP**) a medida del aumento progresivo del gasto de gas (aire).

Las caídas de presión dentro de la tubería de producción resultaron ser pequeñas, esto se entiende debido a que el modelo experimental tiene una longitud mínima, menor a un metro de longitud. Reflejando estos resultados a alguna instalación de bombeo neumático instalada, nos permite tener un mayor control del pozo y a su vez cuidar de las instalaciones superficiales que son las que tienen un mayor costo económico.

El uso del polietileno mostró un comportamiento de deformación proporcional a la fuerza (presión de inyección). Traduciendo así que la constante de deformación dependía de la cantidad de gas inyectada.

Se aprecia que la elevación del centro de masa de las burbujas avanza de manera proporcional a la inyección, interpretando así que la inyección se da de manera constante

y controlada, de acuerdo con la gráfica Presión vs Gasto de la figura 6.3 A mayor cantidad de gas inyectado, el gasto incrementa de manera proporcional y el tiempo de producción disminuía.

Comprobamos que para el BN se requiere de una gran disponibilidad de gas, retribuyéndose así en el gasto de producción

La válvula al no tener un domo y regir la apertura con la elasticidad del polietileno, la inyección puede realizarse con una $P_h=1.2$, a diferencia de una válvula convencional que requiere de una presión del doble.

Después de realizar las pruebas a diferentes presiones de inyección, se realizó una prueba más del modelo que consistió en dejarlo en modo estático durante 30 días y comprobar que no hubiera invasión de líquido al espacio anular.

Finalmente, el modelo propuesto de la válvula de acuerdo con nuestros resultados comprobamos que la misma tiene un buen desempeño relacionándolo con una válvula comercial.

Por último, para dar a conocer nuestro trabajo, este se presentó en el Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica CIBIM-2019 en la ciudad de Cartagena, Colombia y en la 23° Exposición Internacional del Sector Energético-Transporte, Medición, Calidad, Almacenamiento y Comercialización de Energías 2019 en Boca del río, Veracruz y en el LXII Congreso Nacional de Física en Villahermosa, Tabasco 2019. Los comentarios al trabajo lo han hecho acreedor a varias citas en diferentes trabajos publicados.

REFERENCIAS

- [1] Robin Beckwith. "Pumping Oil: 155 Years of Artificial Lift". SPE-1014-JPT. 66-10. octubre 2014.
- [2] Andrew Cone, Walter R. Johns. "Petrolia: A Brief History of the Pennsylvanian Petroleum Region from 1859 to 1869". New York: D. Appleton and Co.1870.
- [3] A. Baizabal G., I. Yair Roa A., "Análisis de una variante de bombeo neumático utilizando tecnología Venturi en campos de crudo pesado". FI. UNAM, 2013.
- [4] J. Angel G. Cabrera, "Producción de pozos I", FI. UNAM, 1986.
- [5] Organismo Enlace para Latinoamérica del comité técnico internacional ISO/TC 176., PEMEX. Estudio Sectorial de válvulas de proceso para la Industria Petrolera en México. 2013
- [6] Alfredo Chaparro Ponce. Explotación de campos maduros empleando sistemas artificiales de producción. FI. UNAM. 2012.
- [7] José Castillo Rosales., Bombeo Neumático Continuo. FI. UNAM, 2005.
- [8] J. Armando Pérez G., J. Mariana Ruiz R., Metodología para determinar la eficiencia del bombeo neumático continuo (BNC). FI. UNAM. 2013.
- [9] J. Ángel Gómez Cabrera. Apuntes de Producción de Pozos I. División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Departamento de Explotación del Petróleo. FI UNAM, 1986.
- [10] Manual de Diseño Schlumberger. Gas Lift and Technology. 2000. Pp [20-60].
- [11] Hirschfeldt, M. Martínez, P. Distel, Fernando. Artificial-Lift Systems Overview and Evolution in a Mature Basin: Case Study of Golfo San Jorge. SPE. 2007. 2
- [12] Eson Rod. Optimizing Mature Oil Fields Through the Utilization of Alternative Artificial Lift Systems. SPE. 1997.
- [13] Gachuz Muro, Heron; Alcazar Cancino, Luis; Guerra López, Mauricio. Using a New Artificial-Lift System in Mexican Mature Oil Fields. SPE. 2007.

- [14] Gachuz Muro, Heron. Analogous Reservoirs to Chicontepec, Alternatives of Exploitation for this Mexican Oil Field. SPE, 2009.
- [15] A. Ortiz, J. Luis Rodríguez. Tesis Análisis Dimensional para flujo multifásico en una tubería de producción con un diferencial de teta. FI. UNAM. 2018.
- [16] J. A. Hernández P. y J. M. Ruiz R. Tesis Metodología para determinar la eficiencia del Bombeo Neumático. FI. UNAM. 2013
- [17] Juan A. Morente C. Técnicas Experimentales Básicas. Departamento de física, Universidad de Granada. 2016. Pp [83-104]
- [18] Hasan N. Oguz, Jun Zeng. Production of gas bubbles in reduced-G Enviroments. Department of Mechanical Engineering. The Johns Hopkins University. 1996.
- [19] Tao Ye, Joseph L. Bull. Microbubble Expansión in a Flexible Tube. Biomedical Engineering Department. The university of Michigan.
- [20] S. Guet, G. Ooms. Fluid Mechanical Aspects of the Gas-Lift Technique. The Annual Review of Fluid Mechanics. 2006. Pp. [225-249]
- [21] S. Guet, G. Ooms, R.V.A Oliemans, R.F Mudde. Bubble Injector Effect on the GasLift Efficiency. AIChE Journal. Vol. 49. 2003. Pp. [2242-2252]