

**HERRAMIENTA SOFTWARE QUE PERMITA OPTIMIZAR EL DESEMPEÑO  
DEL BOMBEO HIDRÁULICO TIPO JET**

**LUIS JOSÉ ABAÚNZA DURÁN  
DANIEL JOSÉ MOTTA LÓPEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2015**

**HERRAMIENTA SOFTWARE QUE PERMITA OPTIMIZAR EL DESEMPEÑO  
DEL BOMBEO HIDRÁULICO TIPO JET**

**LUIS JOSÉ ABAÚNZA DURÁN  
DANIEL JOSÉ MOTTA LÓPEZ**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de:  
INGENIERO DE PETRÓLEOS**

**DIRECTOR**

**MANUEL CABARCAS SIMANCAS  
Ingeniero de Petróleos, M.Sc**

**CODIRECTOR**

**FERNANDO CALVETE GONZÁLEZ  
Ingeniero de Petróleos, M.Sc**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS**

**Bucaramanga**

**2015**

## DEDICATORIA

A Dios por darme la fortaleza para alcanzar mis metas,

A mis padres, Luis J. y Slendy, por su incondicional guía a lo largo de mi formación

A mi hermana Andrea por su gran amor que siempre me acompaña,

A mi abuelita Amelia por su inigualable cariño y comprensión,

Al profesor Manuel Cabarcas por su guía durante el desarrollo del proyecto,

Al profesor Fernando Calvete por su apoyo y consejos durante el proyecto,

A la Universidad Industrial de Santander por todos los conocimientos y experiencias brindadas, que estoy seguro tendrán un valor incalculable durante el resto de mi vida

A mis demás familiares y amigos por los buenos momentos compartidos, en especial a Silvia por su apoyo incondicional

*Luis José Abaúnza Durán*

## DEDICATORIA

A Dios, por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio

A mis padres, José y Margarita por darme la vida, por brindarme amor y apoyo durante toda mi vida, por sus consejos, por darme la oportunidad de estudiar, por creer incondicionalmente en mí, por llenar mi vida de enseñanzas y valores que me han hecho llegar a esta instancia fundamental en mi vida.

A mis hermanas, Diana y Nathalia por llenar mi vida de amor y apoyarme en todo momento.

A mi familia y a mis amigos por compartir tantos momentos agradables, por sus enseñanzas y su afecto incondicional.

Al profesor Manuel Cabarcas por la oportunidad que me ha brindado para realizar este proyecto y aprender de él

A todos los profesores que he tenido desde el colegio hasta la universidad por todo lo que he aprendido hasta hoy.

A la Universidad Industrial de Santander por llenarme de conocimientos y por tantos momentos inolvidables que viví durante toda la carrera que me hacen ser una persona integral.

*Daniel José Motta López*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al director del proyecto, ingeniero Manuel Cabarcas Simancas, por su confianza y motivación constante en esta etapa.

Al codirector del proyecto, ingeniero Fernando Calvete por su guía y apoyo durante la elaboración del proyecto;

A los ingenieros, Luis José Abaúnza, Alejandro Idrobo, José Motta y Erik Giovanni Montes por sus contribuciones y recomendaciones a nuestro trabajo.

A todos quienes hicieron posible alcanzar los objetivos propuestos en el presente trabajo.

# CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	19
1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	21
1.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA .....	21
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	21
1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	22
2 JUSTIFICACIÓN.....	24
3 OBJETIVOS.....	25
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	25
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
4 ESTADO DEL ARTE.....	26
4.1 ASPECTOS GENERALES DEL BOMBEO HIDRÁULICO TIPO JET .....	26
4.2 RESEÑA HISTORICA DEL BOMBEO HIDRAULICO TIPO JET.....	31
4.2.1 Evolución del Bombeo Hidráulico Jet.....	32
4.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL BOMBEO JET.....	35
4.3.1 Ventajas .....	35
4.3.2 Desventajas.....	35
4.4 TIPOS DE BOMBAS JET.....	33
4.4.1 Bomba Jet de Chorro Sencilla.....	34
4.4.2 Bomba Jet de Alto Volumen .....	35
4.4.3 Bomba Jet de Mango Deslizante.....	36
4.4.4 Bomba Jet de Cilindro Fijo .....	37

4.4.5 Bomba Jet de Circulación Inversa .....	38
4.4.6 Bomba Jet de Tubing/Empaque .....	39
4.4.7 Bomba Jet de Casing Fijo .....	40
4.5 EL FLUIDO DE POTENCIA.....	41
4.5.1 Agua .....	42
4.5.2 Petróleo Crudo.....	42
4.6 DESAFÍOS OPERACIONALES EN EL BOMBEO TIPO JET .....	44
4.6.1 Escamas en el Bombeo Jet .....	44
4.6.2 Inserción de Caja Dañada .....	44
4.6.3 Mediciones.....	45
4.6.4 Standing Valve .....	45
4.6.5 Falla del Empaque.....	45
4.6.6 Optimización en la instalación del tamaño de la bomba jet .....	46
4.6.7 Estancamiento de la Bomba Jet .....	46
4.6.8 Fenómeno de Cavitación.....	46
4.7 INSTALACIONES Y DISPOSITIVOS DEL BOMBEO HIDRÁULICO JET ...	46
4.7.1 Instalaciones de Superficie .....	47
4.7.2 Configuraciones de Subsuelo.....	51
5 FUNDAMENTOS DE DISEÑO EN EL BOMBEO HIDRÁULICO TIPO JET .	53
5.1 INTRODUCCIÓN.....	53
5.2 TEORÍA GENERAL.....	54
5.2.1 Fundamento Matemático.....	54
5.3 REPRESENTACIÓN MATEMÁTICA.....	56
5.3.1 Secuencia de cálculo.....	64

5.4	FABRICANTES DE BOMBAS HIDRÁULICAS TIPO JET .....	73
5.5	RELACIÓN DE RENDIMIENTO DE INFLOW ( <i>IPR</i> ) .....	76
5.5.1	Método de Sukamo.....	76
6	FUNDAMENTACIÓN ALGORÍTMICA DE LA HERRAMIENTA SOFTWARE	80
6.1	INTRODUCCIÓN.....	80
6.2	DIAGRAMA DE FLUJO .....	81
7	MANUAL DE USUARIO.....	87
7.1	INSTALACIÓN DEL SOFTWARE.....	87
7.2	DATOS DE ENTRADA .....	89
7.2.1	Datos de la Bomba: .....	90
7.2.2	Datos de Completamiento: .....	90
7.2.3	Datos de Producción: .....	90
7.3	DATOS DEL <i>IPR</i> : .....	92
7.4	RESULTADOS .....	94
7.4.1	Resumen de Resultados Iterativos .....	95
7.4.2	Resumen de Resultados de la Bomba .....	97
7.4.3	Gráfica de resultados del <i>IPR</i> .....	98
7.5	EJEMPLO DE APLICACIÓN .....	98
7.5.1	Solución.....	100
7.5.2	Análisis de Resultados .....	103
8	CONCLUSIONES .....	105
9	RECOMENDACIONES.....	107
	BIBLIOGRAFIA .....	108

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Principio Físico Bomba Jet .....	26
Figura 2. Diagrama General del Bombeo Hidráulico Tipo Jet .....	31
Figura 3. Tipos de Bombas Jet .....	33
Figura 4. Bomba Jet de Chorro Sencilla .....	34
Figura 5. Bomba Jet de Alto Volumen .....	35
Figura 6. Bomba Jet de Mango Deslizante .....	36
Figura 7. Bomba Jet de Cilindro Fijo.....	37
Figura 8. Bomba Jet de Circulación Inversa .....	38
Figura 9. Bomba Jet de Tubing/Empaque .....	39
Figura 10. Bomba Jet de Casing Fijo.....	40
Figura 11. Tipos de Bombas Jet .....	41
Figura 12. Instalaciones de Superficie .....	50
Figura 13. Configuraciones de Subsuelo .....	52
Figura 14. Esquema general bombeo hidráulico tipo jet .....	57
Figura 15. Valores máximos de H.....	62
Figura 16. Curvas de Desempeño Adimensional.....	63
Figura 17. Logotipo de la herramienta Jet Pump Design .....	88
Figura 18. Presentación de la herramienta “Jet Pump Design” .....	88
Figura 19. Datos de entrada de la herramienta “Jet Pump Design” .....	89
Figura 20. Opción para escoger entre el tipo de fluido de inyección y el tipo de producción. ....	90
Figura 21. Opción para seleccionar el tipo de producción. ....	91
Figura 22. Propiedades restantes sección de datos de producción.....	92
Figura 23. Sección Rendimiento de Influjos IPR.....	92
Figura 24. Datos de Salida .....	94
Figura 25. Resumen de Resultados iterativos .....	96
Figura 26. Resumen de resultados de la bomba .....	97

Figura 27. Resumen de resultados del IPR .....	98
Figura 28. Datos de entrada, ejemplo de aplicación .....	100
Figura 29. Resultados de la bomba jet .....	101
Figura 30. Resultados del IPR .....	101
Figura 31. Resumen iterativo para cada variable.....	102

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Nomenclatura ecuaciones de diseño bombeo hidráulico tipo jet .....	59
Tabla 2. Áreas boquillas y gargantas para cuatro fabricantes distintos .....	75
Tabla 3. Constantes para la ecuación 34 (Perforación Overbalanced).....	79
Tabla 4. Constantes para la ecuación 34 (Perforación Underbalanced).....	79
Tabla 5. Dimensiones de la bomba Kobe .....	103
Tabla 6. Dimensiones de la bomba National .....	103
Tabla 7. Dimensiones de la bomba Guiberson .....	104
Tabla 8. Dimensiones de la bomba Claw.....	104

## LISTA DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1. Tasa del fluido motriz .....	56
Ecuación 2. Relación adimensional de recuperación de presión .....	57
Ecuación 3. Variable usada para definir H .....	57
Ecuación 4. Relación de Áreas .....	58
Ecuación 5. Relación de flujo adimensional .....	58
Ecuación 6. Relación adimensional de presiones .....	58
Ecuación 7. Presión a la entrada de la boquilla .....	61
Ecuación 8. Relación adimensional de flujo en el límite de la cavitación .....	64
Ecuación 9. Gradiente del petróleo producido .....	65
Ecuación 10. Gradiente del fluido de formación .....	65
Ecuación 11. Factor volumétrico de formación .....	65
Ecuación 12. Tasa del fluido motriz .....	65
Ecuación 13. Perdidas de presión por fricción del fluido motriz .....	66
Ecuación 14. Numero adimensional para el cálculo de pfn y pfd .....	66
Ecuación 15. Pérdida de presión por fricción del fluido motriz .....	66
Ecuación 16. Pérdida de presión por fricción del fluido de retorno .....	66
Ecuación 17. Presión del fluido motriz en la boquilla .....	67
Ecuación 18. Tasa del fluido de retorno .....	67
Ecuación 19. Gradiente del fluido de retorno .....	67
Ecuación 20. Fracción de agua del fluido de retorno .....	67
Ecuación 21. Fracción de agua del fluido de retorno .....	68
Ecuación 22. Relación gas-líquido .....	68
Ecuación 23. Viscosidad fluido de retorno .....	68
Ecuación 24. Presión de descarga de la bomba .....	69
Ecuación 25. Relación adimensional de recuperación de presiones .....	69
Ecuación 26. Relación adimensional de flujo .....	69

Ecuación 27. Número adimensional 1 .....	70
Ecuación 28. Número adimensional 2 .....	70
Ecuación 29. Número adimensional 3 .....	70
Ecuación 30. Número adimensional 4 .....	70
Ecuación 31. Coeficiente de pérdidas combinado cámara de mezclado difusor ...	70
Ecuación 32. Coeficiente de pérdidas de la boquilla.....	70
Ecuación 33. Relación de flujo adimensional en el límite de la cavitación .....	71
Ecuación 34. Presión superficial de operación .....	72
Ecuación 35. Área de flujo de la boquilla .....	72
Ecuación 36. Curva $i_{pr}$ .....	78

## RESUMEN

**TITULO:** HERRAMIENTA SOFTWARE QUE PERMITA OPTIMIZAR EL DESEMPEÑO DEL BOMBEO HIDRÁULICO TIPO JET\*

**AUTORES:** ABAÚNZA DURÁN, Luis José; MOTTA LÓPEZ, Daniel José\*\*

**PALABRAS CLAVES:**

Bombeo hidráulico tipo jet

Bomba Jet

Curvas IPR

Curvas de desempeño de la bomba.

La producción de hidrocarburos, siendo el objetivo más importante en la ingeniería de petróleos, trae consigo el estudio, diseño, análisis y optimización de los sistemas que permiten llevar el fluido a superficie, sea por levantamiento artificial o por energía natural del yacimiento. En algunas ocasiones la producción se encuentra por debajo de la capacidad esperada y se infiere que es por algún problema en la formación, sin embargo puede ser por una falla en el sistema de levantamiento artificial, donde, muchas veces un solo componente restringe la tasa de producción diaria.

El bombeo tipo jet es una variante del bombeo hidráulico, el cual ha incrementado su aplicación debido a su flexibilidad y durabilidad. El principio básico de este sistema de levantamiento artificial, es inyectar un fluido a alta presión hacia el fondo del pozo (fluido motriz), para transferir energía a la bomba de fondo y de esta manera poder operarla. Este sistema presenta la gran ventaja de no poseer partes móviles dentro de su configuración interna, por lo que se evita la corrosión. Además, para ciertas condiciones de operación es posible seleccionar las áreas adecuadas de boquilla y garganta, evitando la cavitación, y reduciendo incertidumbre en ciertos cálculos primordiales en campos y/o pozos petroleros.

La no existencia de un algoritmo que explique la metodología para optimizar la geometría de la bomba jet, inicialmente descrita por Smart, genera la necesidad de crear una herramienta que optimice y haga del sistema de levantamiento artificial hidráulico tipo jet, una alternativa más rentable a la hora de producir. Con este estudio se pretende elaborar un instrumento que permita calcular los mejores parámetros geométricos, y así reducir incertidumbre y como resultado, la optimización de las características de la bomba y del proceso de extracción del aceite.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Manuel Cabarcas Simancas. Codirector: Fernando Calvete González

## ABSTRACT

**TITLE:** SOFTWARE TOOL THAT PERMITS THE OPTIMIZATION OF PERFORMANCE IN HYDRAULIC JET PUMPING\*

**AUTORES:** ABAÚNZA DURÁN, Luis José; MOTTA LÓPEZ, Daniel José\*\*

**KEYWORDS:**

Hydraulic Jet Pumping

Jet Pump

IPR Curves

Performance Curves

The production of hydrocarbons, being the most important objective in petroleum engineering, brings the study, design, analysis and optimization of the systems that take the fluid to surface, by artificial lift or due to the natural energy of the reservoir.

In some occasions the production is under the expected capacity and it can be inferred that it is because of some problem in the formation, nevertheless it could be some failure in the artificial lift system, where, a lot of times just one component restricts the daily production rate.

Jet pumping, is a type of hydraulic pumping, which has incremented its application due to its flexibility and durability. The basic principle of this artificial lift system, is to inject a high pressure fluid to the bottom of the well (motor fluid), to transfer energy to the pump inside the hole and by this way being able of operating it. This system presents the great advantage, of not possessing mobile parts within its internal configuration, so it can prevent corrosion. Also, for certain operating conditions it's possible to select the right nozzle and throat areas, avoiding cavitation, therefore reducing uncertainty in certain primary calculations in oil wells and/or fields.

The non-existence of an algorithm that explains the methodology for optimizing the geometry of the jet pump, initially described by Smart, generates the necessity of creating a tool that optimizes and makes of the hydraulic jet pump system, a more reliable alternative at the time of producing. With this study, it is pretended to elaborate an instrument that allows the calculation of the best geometric parameters, reducing uncertainty and as a result, optimizing the characteristics of the pump and the oil extraction process.

---

\* Work Degree

\*\* Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Petroleum Engineerin. Director: Manuel Cabarcas Simancas. Codirector: Fernando Calvete González

## INTRODUCCIÓN

En un mundo cada vez más dependiente de energía, el rol de la ingeniería de petróleos toma un papel preponderante, siendo la mayor fuente de recursos energéticos de la actualidad, aplicados en muchas áreas industriales. El ingeniero de producción en su aspiración por hacer llegar el fluido a superficie, en algunas ocasiones se ve enfrentado a retos que el empirismo no es capaz de resolver. Por lo que la utilización de herramientas computacionales le vendrían bien para despejar dudas en los cálculos y obtener resultados más precisos.

El desarrollo del presente trabajo de pregrado, iniciará en el primer capítulo con la descripción de todos los aspectos fundamentales del bombeo hidráulico tipo jet, a la vez que se presentan las distintas bombas jet que se pueden encontrar en la industria. Luego se exponen las ventajas y desventajas de este método de levantamiento artificial, los distintos desafíos operacionales que se pueden presentar durante su manipulación y las diferentes tipos de instalaciones de superficie, al igual que las configuraciones de subsuelo.

Después se llega al segundo capítulo, en donde se estudian más a fondo los conceptos matemáticos utilizados en el diseño del bombeo hidráulico tipo jet. Posteriormente se presenta una secuencia de cálculo directo para determinar la geometría óptima de una bomba jet para una aplicación determinada. Se revisan los conceptos necesarios del bombeo hidráulico tipo jet para poder explicar el procedimiento de dimensionamiento.

El método usa las curvas de desempeño de las bombas jet. Se calcula un área de boquilla y se selecciona una relación de áreas. Esta información se usa para seleccionar una de las geometrías dadas por cualquier fabricante. Entre los fabricantes que se añadieron a la herramienta se tienen a: Kobe, National,

Guiberson y Claw. También se introduce el tipo de ecuación a usar en el IPR, la cual es definida por el método de Sukamo.

En el tercer capítulo denominado “Fundamentos algorítmicos de la herramienta software” se despliega el diagrama de flujo diseñado por los autores específicamente para el software, junto con su respectiva explicación.

En el cuarto capítulo, señalado como el “Manual de Usuario”, se exhibe el paquete creado cuyo nombre es “JP Design”, se comienza con el paso a paso de la instalación de dicha herramienta, se introduce al usuario en la ventana de iniciación, luego se expone la ventana de entrada de datos, se explica cada una de las secciones, ya sean datos de la bomba, de completamiento, de producción o del IPR. Más adelante se explica la sección de datos de salida, junto a una tabla que posee un resumen de todos los resultados iterativos para cada una de las propiedades presentes dentro del sistema. A la vez que se presentan las dimensiones óptimas de la bomba para las condiciones de operación respectivas. La gráfica del IPR también se muestra en esta ventana. Por último se expone un ejemplo de aplicación que confirma la validez de la metodología, ya que nos entrega las áreas óptimas de la bomba seleccionada a las condiciones de operación establecidas.

# 1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

## 1.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

El bombeo tipo jet es una variante del bombeo hidráulico, el cual ha incrementado su aplicación debido a su flexibilidad y durabilidad. El principio básico de este sistema de levantamiento artificial, es inyectar un fluido a alta presión (fluido motriz) hacia el fondo del pozo, para transferir energía a la bomba de fondo y de esta manera poder operarla. El bombeo hidráulico tipo jet tiene como ventaja su aplicación en pozos profundos y desviados.

En las bombas de desplazamiento positivo, como en el caso del bombeo hidráulico tipo pistón y del bombeo mecánico, se reduce su vida útil cuando se tienen sólidos presentes en el fluido de producción, situación similar ocurre en el bombeo electrosumergible. Sin embargo, esto no sucede cuando se utiliza el bombeo hidráulico tipo jet, ya que no tiene partes en movimiento. Además es posible operarlo durante más tiempo en medios corrosivos y fluidos que contienen arena.

Previamente al desarrollo de la herramienta software presentada, la solución se obtenía mediante el método de ensaye y error, seleccionando las áreas de boquilla y garganta y que la bomba no presentara cavitación, sin embargo, no se enfocaba el problema a la selección de la bomba óptima (diámetro de boquilla y diámetro de garganta), para la operación adecuada del sistema.

## 1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El principio de operación del bombeo hidráulico tipo jet, se basa en la inyección de un fluido, denominado fluido motriz, hasta la profundidad de la bomba de fondo. Dicho fluido, llega a la boquilla a una alta presión definida como  $P_M$ . En este punto el fluido motriz a alta presión es dirigido a través de la boquilla, la cual transforma la

energía potencial (presión) en energía cinética (fluido a alta velocidad), disminuyendo considerablemente la presión del fluido motriz.

La baja presión del fluido motriz permite que los fluidos del yacimiento entren al pozo y posteriormente a la bomba de fondo, a la presión  $P_S$  y a la tasa de producción  $Q_S$ . La alta velocidad (momentum) del fluido motriz se mezcla con la baja velocidad (momentum) de los fluidos producidos, en una sección de área constante denominada garganta (throat). A la mezcla de fluidos se le llama fluido de retorno.

Cuando el fluido de retorno, alcanza la parte final de la cámara de mezclado, tiene baja presión y alta velocidad. El fluido entonces sale de la bomba a través del difusor, para transformar la energía cinética en presión, estableciéndose de esta manera de nuevo un estado de alta presión y baja velocidad. Esta alta presión de descarga  $P_D$ , debe ser suficiente para llevar la tasa del fluido de retorno  $Q_D$ , hasta la superficie.

La optimización del sistema por medio de un software, seleccionando las áreas de boquilla y garganta ajustadas para obtener la relación óptima de las áreas (R), permitiendo instalar los elementos más confiables para producir la cantidad de fluido deseada para las variables entregadas por el pozo.

### **1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

Por la no existencia de una herramienta que nos permita disminuir el empirismo para obtener resultados más precisos y acordes a las condiciones de nuestro pozo, se propone como aporte, diseñar una herramienta software para optimizar el desempeño del bombeo hidráulico tipo jet.

Al seleccionar la geometría óptima de la bomba tipo jet: primero se debe escoger la bomba que levante el fluido con los menores requerimientos de potencia y, segundo, que no exista cavitación en la bomba. La cavitación ocurriría en la bomba cuando la presión estática del fluido producido dentro de la cámara de mezclado sea menor

que la presión de saturación del fluido producido. Al ocurrir la cavitación la cámara de mezclado puede resultar dañada, por lo que es necesario seleccionar otra bomba, la cual aunque requiera mayor potencia HP, evitaría dichos daños.

Para calcular la geometría óptima de la bomba se debe especificar la presión de operación superficial deseada. Como regla general, la mayor eficiencia se obtiene con la mayor presión de operación superficial, debido a que se requiere una menor tasa de fluido motriz y como consecuencia se tiene menos pérdidas de presión por fricción en la tubería.

Mediante el cálculo de los distintos gradientes que se obtienen, tanto en la tubería de inyección como en la tubería de descarga, se pueden calcular las distintas presiones del sistema para poder hallar la relación adimensional de presiones, luego haciendo uso de las curvas de desempeño hallar la relación de áreas boquilla/garganta, la relación adimensional de caudales y despejar las áreas de boquilla y de garganta para la bomba. Por último con la ecuación de Sukamo, estableciendo una presión de fondo fluyente y una presión de reservorio e introduciendo los tiros por pie y el radio de perforación, se procede a dibujar la gráfica del IPR.

## 2 JUSTIFICACIÓN

La producción de hidrocarburos, siendo el objetivo más importante en la ingeniería de petróleos, trae consigo el estudio, diseño, análisis y optimización de los sistemas que permiten llevar el fluido a superficie, sea por levantamiento artificial o por energía natural del yacimiento. En algunas ocasiones la producción se encuentra por debajo de la capacidad esperada y se infiere que es por algún problema en la formación, sin embargo puede ser por una falla en el sistema de levantamiento artificial, donde, muchas veces un solo componente restringe la tasa de producción diaria.

El bombeo tipo jet es una variante del bombeo hidráulico, el cual ha incrementado su aplicación debido a su flexibilidad y durabilidad. El principio básico de este sistema de levantamiento artificial, es inyectar un fluido a alta presión hacia el fondo del pozo (fluido motriz), para transferir energía a la bomba de fondo y de esta manera poder operarla. Este sistema presenta la gran ventaja de no poseer partes móviles dentro de su configuración interna, por lo que se evita la corrosión. Además, para ciertas condiciones de operación es posible seleccionar las áreas adecuadas de boquilla y garganta, evitando la cavitación, y reduciendo incertidumbre en ciertos cálculos primordiales en campos y/o pozos petroleros.

La no existencia de un algoritmo que explique la metodología para optimizar la geometría de la bomba jet, inicialmente descrita por Smart, genera la necesidad de crear una herramienta que optimice y haga del sistema de levantamiento artificial hidráulico tipo jet, una alternativa más rentable a la hora de producir. La implementación de las herramientas computacionales, junto con los conocimientos y experiencias en que se basa el modelo Blackoil, permitirán describir las condiciones del sistema en el software.

## **3 OBJETIVOS**

### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar una herramienta software que permita optimizar el desempeño del bombeo hidráulico tipo jet.

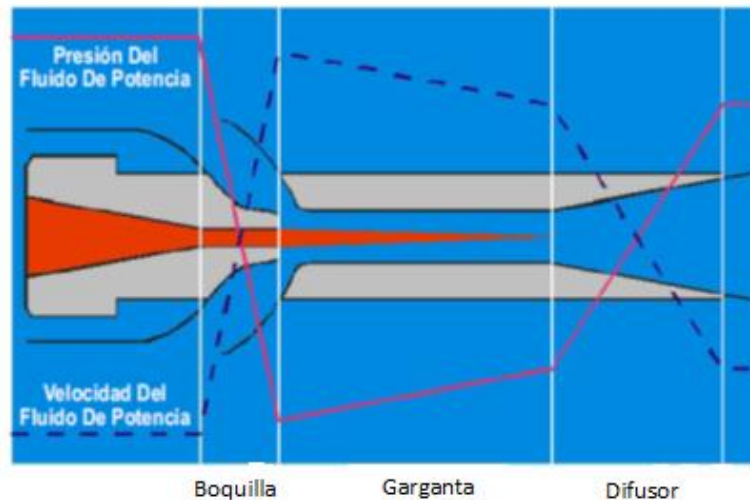
### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar un Estado del Arte del bombeo hidráulico dando su definición y aplicaciones además de explicar el principio físico en el cual se basa el sistema de bombeo hidráulico tipo jet.
- Evaluar y aplicar de ecuaciones de diseño en fondo que serán aplicadas en flujos bifásicos. Identificando la relación de áreas boquilla/garganta para obtener un valor óptimo de la relación adimensional de presión (H), evitando la cavitación.
- Estudiar el comportamiento de Curvas de Desempeño de bombas tipo jet, para poder generar una herramienta que permita obtener un conocimiento más exacto de cómo funciona el levantamiento tipo jet, teniendo en cuenta los parámetros y ajustes necesarios del diseño.
- Diseñar un algoritmo que permita calcular las presiones adecuadas, de acuerdo a cierta configuración de subsuelo y determinar para cuatro fabricantes del sistema de bombeo jet las áreas óptimas de boquilla y garganta a una tasa de producción y presión de fondo establecidas.
- Desarrollar una herramienta software tomando como base la metodología anteriormente mencionada y después validarla mediante un caso de estudio.

## 4 ESTADO DEL ARTE

### 4.1 ASPECTOS GENERALES DEL BOMBEO HIDRÁULICO TIPO JET

**Figura 1.** Principio Físico Bomba Jet



**Fuente:** WEATHERFORD. Hydraulic Jet Lift Systems. En: Jet Pumps. April 2009.

En la producción de hidrocarburos el propósito general es lograr que los fluidos del reservorio lleguen a superficie. Para que un pozo productor pueda entregarnos dichos fluidos es necesario mantener reducida la presión de fondo fluyente. Pero en las últimas etapas de vida del mismo, cuando su presión de fondo ha caído, precisamos de la instalación de un sistema de levantamiento artificial, cuyo principio se basa en mantener una presión reducida para recibir los fluidos que deseamos. Por lo cual la alternativa de un tipo de bombeo hidráulico, como el tipo jet, puede ser considerado como una de las opciones más eficientes, prácticas e interesantes.

Los sistemas de bombeo hidráulico para levantamiento artificial constan de un fluido de potencia (agua o aceite) en superficie, una bomba superficial de alta presión para transmitir el fluido pozo abajo y una bomba de subsuelo accionada por el fluido a

alta presión. El fluido de potencia y el fluido de producción fluyen conjuntamente a la superficie después de pasar a través de la unidad de subsuelo.

La bomba jet es una bomba de tipo hidrodinámico que opera principalmente a través de transferencia de momento, entre dos corrientes de fluido adyacentes. El fluido de potencia a alta presión pasando a través de la boquilla convierte su energía potencial (energía de presión) en energía cinética, en un chorro de fluido a alta velocidad. El fluido del pozo se mezcla con el fluido de potencia en una garganta de área constante o tubo mezclador y el momento es transferido al fluido del pozo, causando un aumento en la energía del mismo. Cuando los fluidos mezclados salen de la garganta, aún están a gran velocidad, ya que contienen energía cinética sustancial. Los fluidos son desacelerados en un difusor de área expansiva que convierte la energía cinética remanente en presión estática suficiente para levantar los fluidos hasta superficie.

Esta bomba opera con el principio de Venturi<sup>1</sup>, convierte la presión en carga de velocidad mediante la inyección de un fluido de potencia a través de una boquilla. Esto crea un efecto de succión que conduce el fluido de producción a través de la bomba. En el difusor la carga de velocidad se convierte en presión, permitiendo el intercambio energético y que el fluido de producción llegue a la superficie a través del conducto de retorno.

Siendo un tipo de bombeo dinámico, las bombas jet poseen curvas de desempeño con características similares a las bombas electro-sumergibles, es posible una familia infinita de curvas, dependiendo de la presión en la boquilla. Diferentes tamaños de gargantas usadas en conjunto con un tamaño dado de boquilla arrojan diferentes curvas de desempeño.

Las curvas generalmente son casi planas con las gargantas mayores, haciendo que la bomba jet sea sensible los cambios en la presión de entrada o de descarga. Como

---

<sup>1</sup> MELO, Vinicio. Optimización de la geometría de la bomba hidráulica jet. Bombas Jet. 2010. p. 1.

las densidades y viscosidades de los fluidos y la presencia de gas afectan las presiones que la bomba maneja, los cálculos para simular el desempeño son complejos e iterativos por naturaleza, prestándose por sí solos a una solución por computador.

Como los tamaños reales de los componentes y las curvas de desempeño asociadas históricamente han sido propiedad de los fabricantes de las bombas, ha sido difícil para el ingeniero de producción evaluar los sistemas de bombeo jet en el diseño de sistemas de levantamiento artificial.

Su fabricación se lleva a cabo con materiales y acabados especiales, normalmente las boquillas y gargantas son elaboradas con carburo de tungsteno o materiales cerámicos, de tal manera que la bomba pueda desempeñarse en ambientes corrosivos y abrasivos. Esto es relativo ya que la vida de una bomba está sujeta a las condiciones del pozo donde se desempeña.

## **4.2 RESEÑA HISTORICA**

La primera bomba conocida fue descrita en el siglo III a.C. por Arquímedes y se conoce como tornillo de Arquímedes, aunque este sistema había sido utilizado anteriormente por Senaquerib, rey de Asiria en el siglo VII a. C. En el siglo XII, Al-Jazari describió e ilustró diferentes tipos de bombas, incluyendo bombas reversibles, bombas de doble acción, bombas de vacío, bombas de agua y bombas de desplazamiento positivo.

De acuerdo a Carvajal y Vásquez (1999), el principio básico del bombeo hidráulico fue utilizado por primera vez para producir petróleo en el año 1875 por un señor de apellido Faucett. La bomba Faucett fue un aparato accionado por vapor de agua, el cual podía ser instalado en el subsuelo y requería un pozo de gran diámetro para operarla. Por esta exigencia en cuanto al diámetro, la bomba Faucett, no encontró muchas aplicaciones comerciales en el campo petrolero. El principio fundamental

sobre el cual se basa el método de bombeo hidráulico es la ley de Pascal, enunciada en 1653 y la cual establece que: **"cualquier cambio de presión aplicado a un fluido se transmite sin alteración a través de todo el fluido"**. La aplicación de este principio permitió el considerar transmitir presión desde un lugar centralizado en superficie hasta cualquier punto en el fondo del pozo.

Las referencias técnicas sobre bombas jet pueden encontrarse desde 1852, pero no fue hasta 1933 que Gosline y O'Brien presentaron un trabajo referente a la aplicación de las bombas tipo jet en pozos productores de aceite. Sin embargo, su aplicación y total aceptación no fue posible hasta después de 1970, tal vez como consecuencia de la aparición de modelos computarizados que permitieron el correcto diseño de la relación boquilla-garganta asegurando el éxito comercial para ese entonces. Las bombas tipo jet no emplean partes móviles en su configuración mecánica, por lo que su acción de bombeo se debe básicamente al efecto de la transferencia de cantidad de movimiento entre el fluido motriz y el fluido producido. El mecanismo de operación de estas bombas está basado en el principio de Bernoulli, el cual enuncia que **"sobre un plano constante, la suma de las energías cinéticas y potencial de un flujo es constante; por lo tanto, si su velocidad aumenta, su presión disminuye y viceversa"**. Estas bombas poseen curvas de comportamiento similares a las bombas electrosumergibles, ya que para un tamaño de boquilla dado, es posible determinar una familia de curvas de comportamiento diferente para diferentes tamaños de gargantas. Por otra parte, las bombas tipo jet toleran el uso de fluidos corrosivos y/o abrasivos, debido a los materiales con que se construye la boquilla y la garganta.

#### **4.2.1 Evolución del Bombeo Hidráulico Jet**

**1932:** Primera bomba hidráulica de fondo instalada. Establecido como Kobe, Inc. por C.J. Coberly.

**1958:** Fluid Packed Pump desarrolla Oilmaster balance de tipo Bomba hidráulica.

**1964:** Kobe es comprado por Baker Oil Tools. Sigue operando como Kobe, Inc.

**1972:** Kobe, Inc. Corre la primera Bomba tipo Jet para producir en pozos petroleros.

**1972:** Fluid Packed Pump introduce el patentado sistema Unidraulic'.

**1977:** Fluid Packed Pump cambia el nombre por National Production Systems.

**1984:** Kobe, Inc, es comprado por Trico Industries, manufacturera de varillas de Bombeo y varillas de bombas de fondo.

**1987:** National Production System se asocia con Oilwell Supply Company.

**1987:** Trico Industries es comprada por PACCAR Inc., manufacturera de camiones.

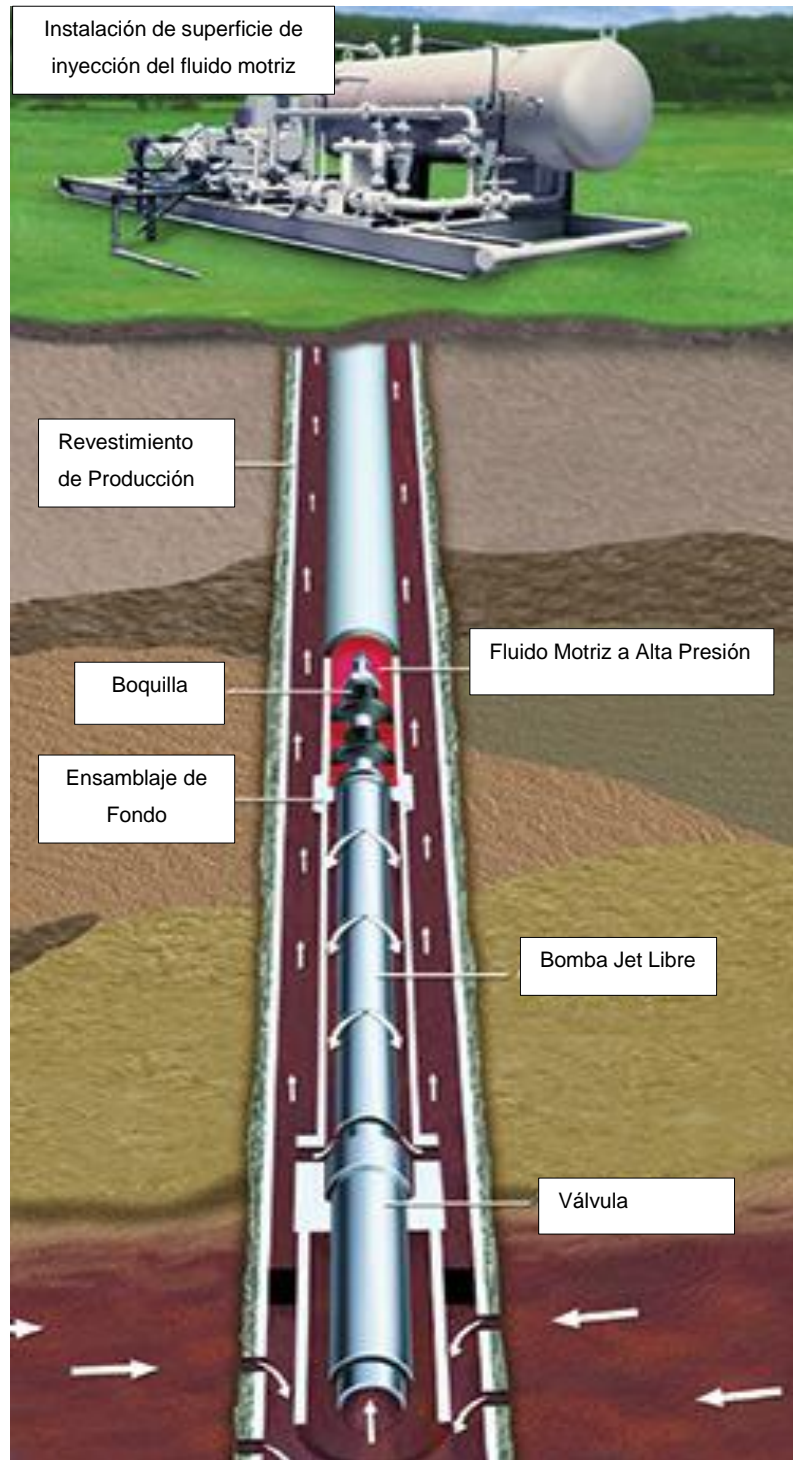
**1994:** La línea de productos Oilmaster (línea de productos hidráulicos de National Oilwell) es comprada por Trico Industries.

**1997:** Trico Industries es comprada por EVI.

**1998:** EVI y Weatherford se fusionan para convertirse en Weatherford Internacional. Weatherford Artificial Lift Systems es una unidad operacional de la compañía.

**2001:** Weatherford Artificial Lift Systems adquirió a Guiberson Hydraulic Pump Product line de Halliburton.

**Figura 2.** Diagrama General del Bombeo Hidráulico Tipo Jet



Fuente: Rotating Right. Artificial Lift Systems, December, 2012 Disponible en Internet:  
<http://www.rotatingright.com/artificial-systems.htm> [modificada por los Autores]

## **4.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL BOMBEO JET**

### **4.3.1 Ventajas**

La bomba jet tiene muchas ventajas respecto a otros sistemas de levantamiento artificial, entre los que encontramos:

- Debido a que no posee partes móviles, la bomba es tolerante no solo a fluidos corrosivos y abrasivos, sino también a fluidos de potencia.
- Su mantenimiento y reparación es económico y poco frecuente, la bomba puede ser reemplazada sin tener que retirar tubería y se compone de pocas piezas.
- La bomba es adecuada para pozos profundos, submarinos, pozos con alto contenido de parafina, alta viscosidad, alto contenido de arenas y particularmente para pozos con GOR por encima de 180.
- La pureza del fluido de potencia puede ser relativamente baja comparada con la calidad del fluido de potencia para la bomba hidráulica tipo pistón.
- Otra gran ventaja es que el agua puede ser usada como fluido de potencia y la fuente de esta agua puede estar ubicada de forma remota y puede manejar altas tasas de volumen.
- Las bombas hidráulicas de tipo jet son adaptables para distintos arreglos de fondo disponibles. El bombeo hidráulico tipo jet es adaptable para todos los BHA de bombeo hidráulico, puede manejar gas libre y es aplicable costa afuera.
- Puede operar a profundidades mayores a los 10000 pies.
- Permite la adición fácil de aditivos e inhibidores al fluido de potencia.

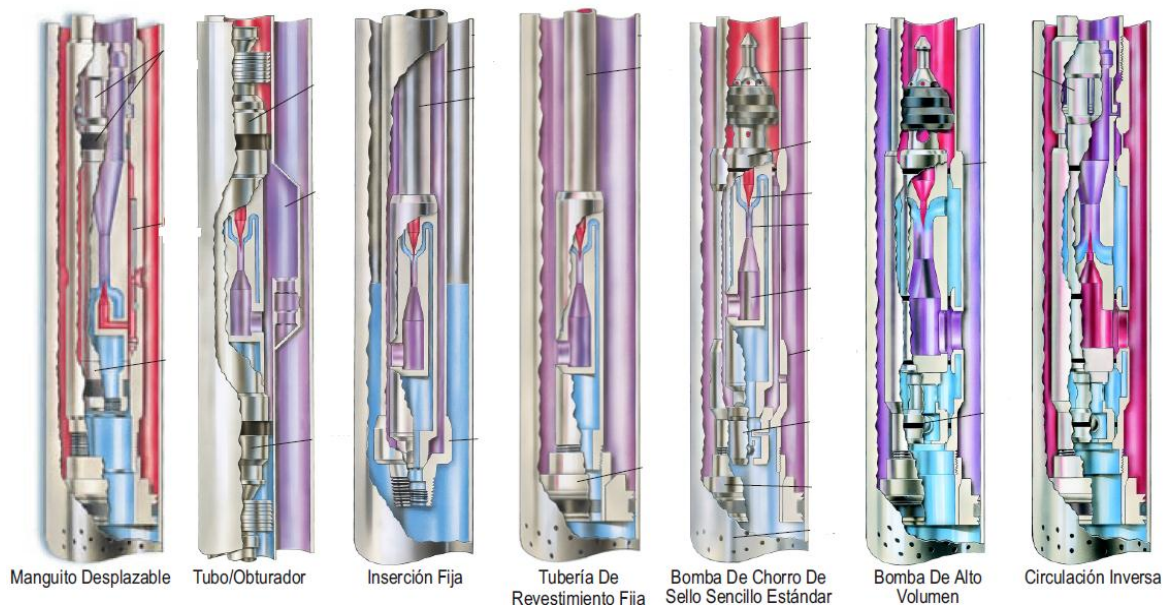
### **4.3.2 Desventajas**

- Existe tendencia a la cavitación cuando hay una baja presión de entrada a la bomba.

- Si se genera turbulencia entre el espacio definido entre boquilla y garganta, puede reducirse la eficiencia de las bombas jet. Es necesario que se controlen parámetros como la presión de inyección en la bomba, presión de descarga en la misma, y las distintas tasas.
- Gran requerimiento de potencia, debido a que la tasa del fluido motriz debe ser inyectada a altas presiones, para que pueda vencer la presión de la columna de retorno. Esto implica grandes cantidades de caballos de fuerza de los motores de las bombas e instalaciones en superficie.

#### 4.4 TIPOS DE BOMBAS JET

**Figura 3.** Tipos de Bombas Jet



**Fuente:** WEATHERFORD. Bombas Hidráulicas de Chorro. En: Bombas Jet. 2004.

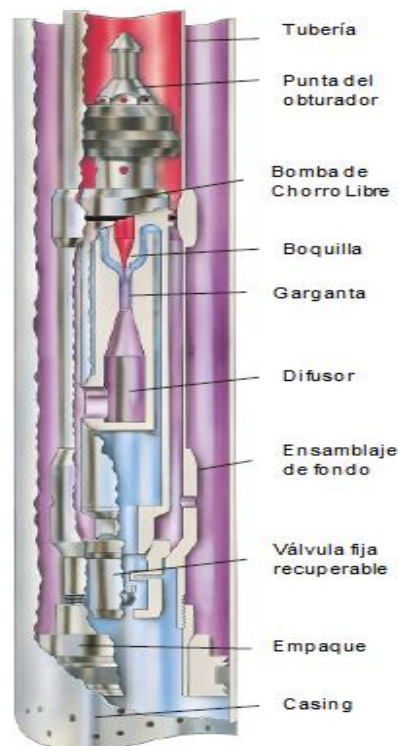
[modificada por los Autores]

La “Jet Pump” consiste de varios componentes entre los que se encuentran la boquilla, la garganta y el difusor. Estos pueden ser ensamblados en una variedad de configuraciones y materiales para adecuarse a los requerimientos de producción y al diseño de fondo de pozo.

#### 4.4.1 Bomba Jet de Chorro Sencilla

Este tipo de bomba va ensamblada en un diseño de fondo que permite la adaptación de una amplia variedad de completamientos de subsuelo realizados por varios fabricantes. Por ser una bomba libre puede recuperarse cambiando el sentido del flujo del fluido de potencia en el espacio anular de la tubería de revestimiento, desencajando la bomba y llevándola a superficie.

**Figura 4.** Bomba Jet de Chorro Sencilla



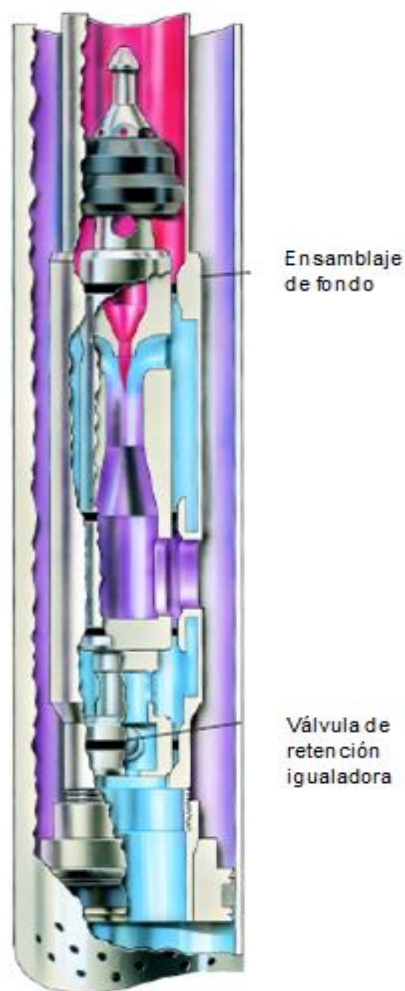
**Fuente:** WEATHERFORD. Hydraulic Jet Lift Systems. En: Jet Pumps. April 2009.

[modificada por los Autores]

#### 4.4.2 Bomba Jet de Alto Volumen

Se instala en configuración de bomba libre, requiere de una configuración especial de fondo debido a que se maneja un chorro a alto volumen. De igual manera se puede trabajar de forma inversa, en este caso no como bomba libre, pero se mantiene en su lugar gracias a una fuerza de sujeción mecánica superior, es instalada y recuperada con las herramientas de pesca de cable convencional.

**Figura 5.** Bomba Jet de Alto Volumen



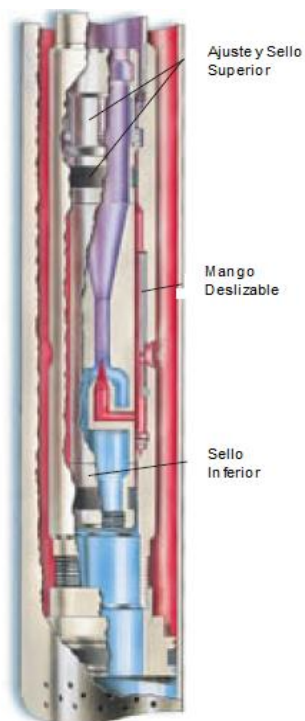
**Fuente:** WEATHERFORD. Hydraulic Jet Lift Systems. En: Jet Pumps. April 2009.

[modificada por los Autores]

#### 4.4.3 Bomba Jet de Mango Deslizante

Es la más popular para los operadores costa afuera. Es manejada principalmente por circulación en reversa con un sello superior, aunque también puede correrse en directa vía tubería. Si una bomba electro-sumergible instalada en el pozo se ha apagado, una bomba jet puede correrse en su lugar, para continuar produciendo el pozo. La circulación en reversa mantiene los fluidos producidos fuera de la tubería de revestimiento con lo que se protege contra la corrosión asimismo permite agregar aditivos al fluido de potencia que es circulado por el anular, sin embargo la presión de estallido de la tubería de revestimiento restringe la presión de inyección del fluido motriz.

**Figura 6.** Bomba Jet de Mango Deslizante



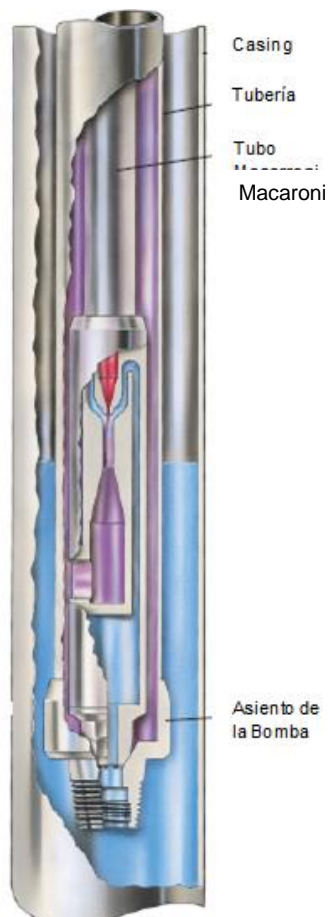
**Fuente:** WEATHERFORD. Hydraulic Jet Lift Systems. En: Jet Pumps. April 2009.

[modificada por los Autores]

#### 4.4.4 Bomba Jet de Cilindro Fijo

Las bombas de cilindro fijo han sido diseñadas para que se desempeñen en una tubería de producción o en un revestimiento, la inserción fija funciona dentro de una tubería de producción en una sarta Macaroni ó en coiled tubing y en el asiento de la bomba es acoplada metal-metal, el fluido de formación y el fluido motriz ascienden por el espacio anular entre el revestimiento y la serie de tubos que sostienen la bomba. También es posible sentarla en un empaque de cilindro y la producción asciende por el espacio anular del cilindro.

**Figura 7.** Bomba Jet de Cilindro Fijo



**Fuente:** WEATHERFORD. Hydraulic Jet Lift Systems. En: Jet Pumps. April 2009.

[modificada por los Autores]

#### 4.4.5 Bomba Jet de Circulación Inversa

Este tipo de bomba puede utilizar el agua caliente como fluido de potencia para disminuir la viscosidad del aceite pesado y aumentar la tasa de producción. La bomba se encuentra localizada en un ensamblaje de fondo o en una manga deslizante, instalada previamente en la tubería.

**Figura 8.** Bomba Jet de Circulación Inversa



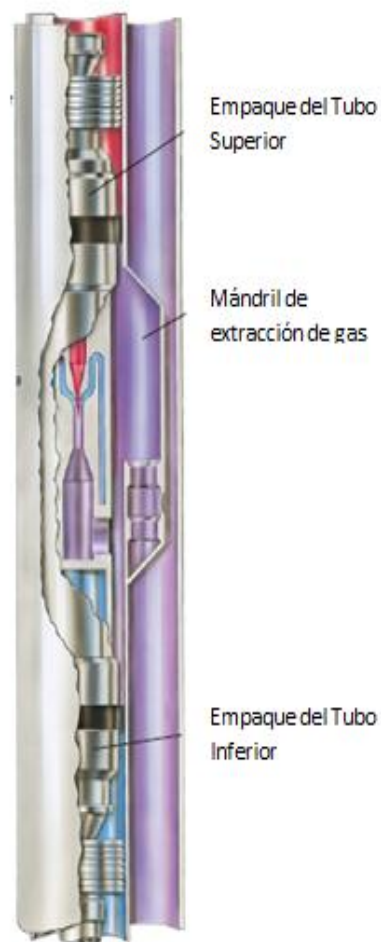
**Fuente:** WEATHERFORD. Hydraulic Jet Lift Systems. En: Jet Pumps. April 2009.

[modificada por los Autores]

#### 4.4.6 Bomba Jet de Tubing/Empaque

Se puede instalar con wireline sin tener que sacar el tubing. Los empaques de la tubería ajustados por wireline en la parte superior e inferior tienen montado un mandril de gas lift. Un diseño alternativo tiene montado wireline con tubería para perforados.

**Figura 9.** Bomba Jet de Tubing/Empaque



**Fuente:** WEATHERFORD. Hydraulic Jet Lift Systems. En: Jet Pumps. April 2009.

[modificada por los Autores]

#### 4.4.7 Bomba Jet de Casing Fijo

Junto a la bomba jet de cilindro fijo, corren sobre casing y tubing de producción. Funciona con coiled tubing o tubería Macaroni mientras que el producido vuelve por el anular del casing.

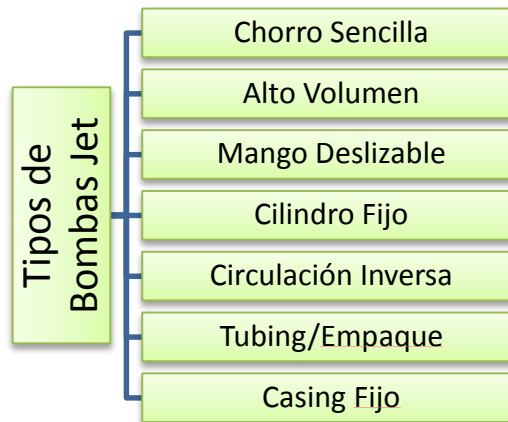
**Figura 10.** Bomba Jet de Casing Fijo



**Fuente:** WEATHERFORD. Hydraulic Jet Lift Systems. En: Jet Pumps. April 2009.

[modificada por los Autores]

**Figura 11.** Tipos de Bombas Jet



#### **4.5 EL FLUIDO DE POTENCIA**

El fluido motriz es la piedra angular del bombeo hidráulico tipo jet y uno de los parámetros que siempre se tienen en cuenta al realizar el diseño. Es el encargado de transferir la energía desde superficie para activar la función del ensamblaje de subsuelo, a su vez protege y lubrica todas las partes del sistema de un desgaste excesivo. Se requiere de un alto grado de pureza y una disminución de los sólidos abrasivos para proteger partes como: pistones, motores y cilindros de las bombas de superficie. Generalmente, es utilizado el aceite crudo como fluido motriz, por su fácil disponibilidad y sus propiedades de lubricación, es recomendado utilizar crudos entre los 20 y 30 grados API y una viscosidad de alrededor de 10 centipoises para obtener los mejores resultados.

Otra opción es el uso de agua como fluido de potencia, entre sus ventajas está su disponibilidad, su bajo costo, el hecho de ser un fluido incompresible, su baja viscosidad y uniformidad, al usar aditivos especiales para añadirle propiedades de lubricación, viscosidad y sobre todo para proteger sus efectos corrosivos en las partes metálicas.

#### **4.5.1 Agua**

Es el fluido de más fácil disposición en la mayoría de campos petroleros, sobretodo en Colombia, posee propiedades uniformes y características de bajo costo. Entre sus ventajas tenemos que permite un mejor control en pruebas de producción porque se conoce que todo el aceite producido proviene de la formación, a su vez presenta la capacidad de eliminar riesgos potenciales de incendio. Como desventaja tenemos el elevado costo de su aditivos, lo que hace que incrementen los costos de mantenimiento dependiendo de la concentración y cantidad de aditivos utilizados. Otra de sus desventajas es que se conoce como mal lubricante por sus propiedades corrosivas y su baja viscosidad. Si bien existen en el mercado aditivos para convertir el agua de formación en agua dulce tratada, aceptable como fluido de potencia, estos aditivos son a la vez inhibidores de corrosión, lubricantes y bactericidas.

#### **4.5.2 Petróleo Crudo**

Debido a su disponibilidad y propiedades físico-químicas es el más indicado como fluido de potencia, su grado de pureza refleja el éxito del sistema de levantamiento, en especial el contenido de sólidos abrasivos en superficie es una variable a ser monitoreada permanentemente en las instalaciones de superficie antes de que el aceite sea inyectado.

Se requiere de un separador de gas para el fluido producido con el fin de retirar el gas en solución y el gas libre del crudo que va a ser utilizado como fluido de potencia, si las cantidades de gas que se manejan son despreciables no es necesario la instalación de separadores.

Si se corrobora la existencia de gas disuelto, este disminuiría la eficiencia de la bomba triplex de superficie y de la bomba jet, ya que el gas por ser altamente compresible afecta la forma como la bomba comprime el líquido disminuyendo drásticamente la presión a la que entrega el fluido motriz que va a ser inyectado al

sistema, esto se traduce en tener que aumentar la velocidad de operación de la bomba, por tal motivo incrementando los caballos de fuerza necesarios y el consumo de energía. Los tanques reciben el crudo, donde se realiza la separación del agua por gravedad, agregándole desemulsificantes y dándole un tiempo de reposo, y así ayudar a romper las emulsiones, permitiendo la decantación de las partículas y sólidos más pesados. De acuerdo a las condiciones operacionales de cada pozo se pueden agregar aditivos, como inhibidores de corrosión, clarificantes y reductores de viscosidad, entre otros.

#### ***4.5.2.1 Parámetros de control sobre el crudo:***

La presencia de materiales abrasivos como sólidos y gases disueltos, afectan gravemente la vida útil de las unidades de superficie, de subsuelo, y su operación por lo cual el control de los parámetros en el sistema de tratamiento de crudo se debe monitorear con frecuencia. Entre los parámetros a considerar tenemos:

- Tamaño máximo de partículas sólidas, 15 micrones en cantidades pequeñas.
- Contenido total de sólidos, máximo 20ppm ó 0.002%.
- Contenido de agua y sedimentos
- Gravedad API
- Contenido de parafinas
- Contenido de sulfuros, para manejar posibles ambientes corrosivos.
- Contenido de sal, máximo 12 libras por 1000 barriles de crudo.

## **4.6 DESAFÍOS OPERACIONALES EN EL BOMBEO TIPO JET**

### **4.6.1 Escamas en el Bombeo Jet**

El agua de los acuíferos junto al agua producida es usada como fluido de potencia. Con el incremento de las operaciones de inyección de agua, se han observado la presencia de más escamas en algunos pozos con bomba jet.

Si el agua de inyección es rica en sulfatos, y si presenta Bario, la mezcla de estas aguas bajo ciertas condiciones de presión y temperatura causa escamas de barita. Se pueden detectar mientras se corren los registros PLT's como un pico en el registro Gamma Ray.

En la garganta de la bomba el agua producida y el agua del fluido motriz se mezclan y genera el ambiente propicio para las escamas de barita. La depositación de escamas causa que disminuya la producción, por ende recuperamos menos fluido. Adicionalmente, la pérdida en el desempeño de la bomba jet, debido a las escamas, requiere regularmente de intervenciones en el pozo para cambiar la bomba, de donde se toma una muestra, para realizar pruebas de solubilidad y difracción de rayos x.

### **4.6.2 Inserción de Caja Dañada**

En algunas ocasiones, se ha observado una declinación en la tasa del fluido de potencia sin ningún cambio en la presión de bombeo en superficie. Esto era normalmente un fenómeno comparado al caso de las escamas donde la declinación era gradual. Durante investigaciones se ha encontrado que la caja que guarda la válvula cheque puede verse comprometida. Luego a veces es necesario cambiar la metalurgia e incrementar el tamaño de la caja para evitar la misma falla en instalaciones subsecuentes.

### **4.6.3 Mediciones**

La precisión en las mediciones del flujo multifásico siempre ha sido un desafío, la inclusión del fluido motriz junto al fluido de producción le añade complejidad adicional al medidor. Para calcular el corte de agua en dichos pozos, la tasa del fluido de potencia en el medidor monofásico, instalado en la entrada del fluido de potencia, debe sustraerse del líquido total medido por el dispositivo. Aunque los medidores monofásicos poseen una mayor precisión, ocasionalmente puede salirse del rango y esto puede conllevar a mediciones incorrectas. Es esencial revisar constantemente la tasa del fluido motriz y del fluido de formación de la muestra de BSW.

### **4.6.4 “Standing Valve”**

Las bombas son inicialmente instaladas después de ajustar una válvula standing en el perfil inferior del niple de la bomba. Esta práctica se lleva a cabo para evitar incidentes de forzamiento con el fluido de potencia, lo cual puede ocurrir debido a un cierre inesperado del pozo. Si hay arenamiento, la recuperación de la válvula standing será más complicada. También la restricción adicional de la válvula, de un diámetro menor, genera una caída de presión adicional en caso de que el pozo produzca mucho líquido.

### **4.6.5 Falla del Empaque**

Se puede generar una falla debido a las cargas cíclicas que generan las fluctuaciones en la presión del fluido motriz.

Para evitar problemas en el sistema se sugiere instalar empaques semi-permanentes. También para evitar una falla en el empaque recuperable es recomendado implementar un procedimiento riguroso que consiste en subir y bajar gradualmente la rata del fluido de potencia.

#### **4.6.6 Optimización en la instalación del tamaño de la bomba jet**

A veces es posible que debido a la falta de los tamaños adecuados de la bomba dentro de los tiempos requeridos se presenten fallas. Estas pueden derivar en una sobreproducción de aguas de producción y una disminución en la extracción del fluido de formación.

#### **4.6.7 Estancamiento de la Bomba Jet**

Es una condición en donde no hay influjo del yacimiento y solamente se circula fluido de potencia en la bomba y la tubería de producción.

#### **4.6.8 Fenómeno de Cavitación**

Este será siempre un problema potencial en las bombas hidráulicas. Sucede cuando la velocidad de entrada a la garganta presenta altos valores que van aumentando hasta que la presión del fluido disminuye tanto que alcanza su presión de vapor. Como consecuencia se forman bolsas de gas generando una restricción de flujo en la garganta. Por ende el colapso de las bolsas de vapor erosiona las paredes de las gargantas, deteriorándolas y disminuyendo su vida útil.

### **4.7 INSTALACIONES Y DISPOSITIVOS DEL BOMBEO HIDRÁULICO JET**

El arreglo del sistema de superficie es llamado abierto porque permite al fluido de potencia expulsado mezclarse con el fluido de producción, es así designado para distinguir del sistema de fluido de potencia cerrado el cual maneja separadamente el fluido de potencia del producido.

El sistema del bombeo hidráulico tipo jet usa un fluido que realiza un proceso de circulación por todas las partes del sistema, incluyendo el punto de toma, tuberías

de conducción en superficie, cabezas de inyección, bombas, válvulas, bomba jet e instalaciones de retorno a superficie. El fluido de potencia es tomado del tanque de almacenamiento y alimenta la bomba triplex/múltiple.

El fluido ahora con la presión incrementada es controlado por válvulas en la estación de control y distribuido hacia uno o varios pozos, esto sucede en las válvulas del cabezal del pozo y es dirigido a las bombas de subsuelo donde el fluido motriz se mezcla con el fluido de producción, retornando a superficie y siendo enviado al sistema de recolección.

#### **4.7.1 Instalaciones de Superficie**

##### ***4.7.1.1 Máquina Motriz:***

Es la fuente de poder del sistema, puede ser un motor eléctrico, de diésel o gas.

##### ***4.7.1.2 Tanque de Almacenamiento del Fluido Motriz:***

El tanque del fluido de potencia ha sido probado a través de los años por ser un diseño excelente. Generalmente el aceite entra al “gas boot” en oleadas que contienen gas no removido en el tratador, gas que está en solución a la presión de 30 psi del tratador. El propósito del gas boot es de remover los últimos remanentes de gas el cual podría de lo contrario mantener el tanque agitado.

Luego entra aceite muerto al fondo del tanque, el cual deberá tener un esparcidor. El aceite que entra es fluido de potencia más aceite de producción. En el punto medio de la vertical la producción es extraída a través de una salida levantada, que mantenga el tanque lleno.

El proceso de asentamiento del fluido de potencia tiene lugar, desde el punto medio hacia arriba. Los sólidos livianos son llevados fuera con la producción, el tanque de almacenamiento donde las partículas más pesadas son llevadas al fondo y deben ser removidas periódicamente. La única modificación usada algunas veces es para permitir a la producción ser retirada del “boot” o entre el “boot” y el tanque quieto, con una salida para mantener el tanque lleno. Esta modificación permite el uso completo del tanque para fluido de potencia solamente, pero un desbalance en el peso de columna de la bifurcación y del tanque puede provocar aparentemente extrañas variaciones en el nivel del fluido del tanque. Con estas modificaciones los sólidos deberán ser drenados desde el fondo más frecuentemente.

Para asegurar el asentamiento adecuado de las partículas el tanque de fluido de potencia deberá ser construido para permitir que la velocidad de subida en la mitad sea de menos de dos pies por hora. Esta rata es de 1500 B/D, para un tanque de 750 barriles y 24 pies de alto. La velocidad debe ser más baja para aceites más pesados que 30 grados API y para operaciones en climas extremadamente fríos.

#### **4.7.1.3 Bomba de Superficie:**

Las bombas más comúnmente usadas son diseñadas específicamente para el servicio de fluido de potencia y son suministrados por los fabricantes de las bombas de fondo de pozo. Estas bombas de alta presión usualmente tienen pistones y camisas que trabajan metal-metal y válvulas tipo bola, componentes que requieren poco o ningún mantenimiento.

Para las bombas que manejan agua, generalmente se utilizan pistones y camisas con empaques. Los accesorios auxiliares requeridos incluyen una válvula de alivio, manómetros e interruptores de seguridad. La mayoría de

las bombas de superficie están montadas en un patín con motor eléctrico o a gas.

Las líneas de descarga de las válvulas de alivio y la válvula de control de contrapresión no deberán ser conectadas directamente a la línea de succión de la bomba, sino que debe ser conectada a una línea separada que regresa al tanque motriz. La razón para esto es que cuando el aceite, aun aceite muerto, es tomado repentinamente desde una alta presión a una baja presión, algo de gas saldrá fuera de solución y este gas causaría una pérdida de eficiencia volumétrica.

#### **4.7.1.4 Manifold de Control:**

Los “manifold” de distribución del fluido de potencia, usado en plantas centrales, son suministrados por los fabricantes de las bombas de subsuelo y son construidos en secciones modulares, que pueden ser añadidas o quitadas desde el “manifold” fácilmente. Esos “manifold” usualmente contienen válvulas operadas con control piloto que permite al volumen de potencia venir a cada pozo de manera constante, sin hacer caso de cambios de presión en el sistema. Un controlador de presión (Regulador de contrapresión) es también usado para mantener una presión constante en la bomba de superficie.

Adicionalmente manómetros y registradores de alta presión están incluidos para cada pozo. Puede ser establecido en el “manifold”, un control de velocidad de la bomba de fondo, un chequeo de la presión, de la eficiencia del motor y un detector de averías

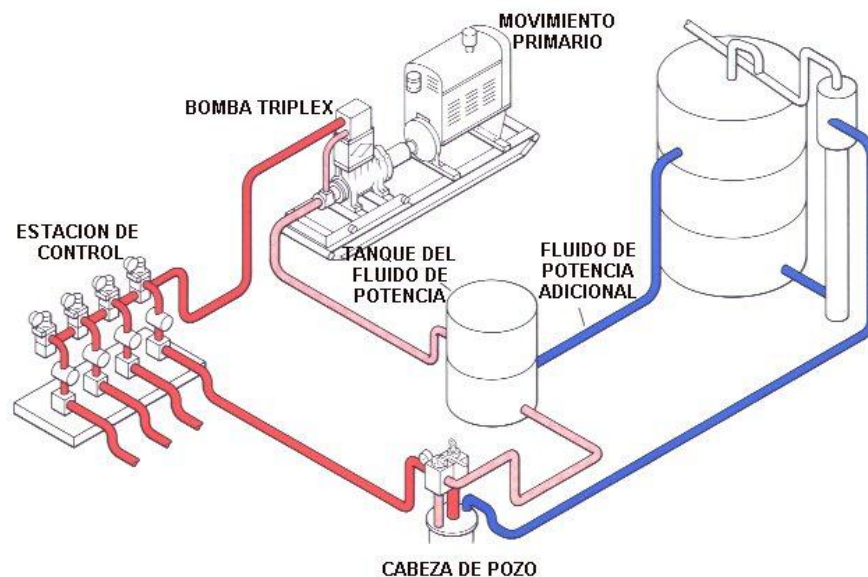
Las válvulas de control de flujo constante, usadas en este “manifold”, trabajan sobre el principio de una caída de presión constante a través de la válvula de control. Un resorte diafragma y una válvula piloto se combinan manteniendo

la presión diferencial a través de la válvula sin tener en cuenta los cambios en el aumento o caída de la presión.

#### 4.7.1.5 Cabezal del Pozo:

Hace posible la conexión de las líneas del fluido motriz desde la estación de control hasta la tubería del pozo. Utiliza una válvula de cuatro pasos, que además ayuda a dirigir los fluidos hacia el fondo y realizar las funciones necesarias para remover la bomba libre del pozo y operarla. Proporciona un medio para la despresurización del tubing.

**Figura 12.** Instalaciones de Superficie



**Fuente:** JJ Tech. Hydraulic Jet Pumps, Disponible en Internet: <http://j-jtech.com/products/hydraulic-jet-pumps/> [modificada por los Autores]

## **4.7.2 Configuraciones de Subsuelo**

El sistema del fluido de potencia es llamado abierto porque permite al fluido de potencia inyectado mezclarse con el fluido de producción, se designa así para distinguir del sistema de fluido de potencia cerrado el cual maneja separadamente el fluido de potencia del producido. Las bombas hidráulicas del tipo jet suelen correrse dentro del hueco en dos configuraciones típicas. Cuando la bomba es adecuada en la tubería y es libre para ser circulada en el fondo y regresar nuevamente a superficie, esta configuración se conoce como “bomba libre y paralela”. Cuando la bomba es roscada en una sarta de tubería y es bajada dentro del pozo se le conoce como “inserto fijo”.

### ***4.7.2.1 Bomba Libre Paralela:***

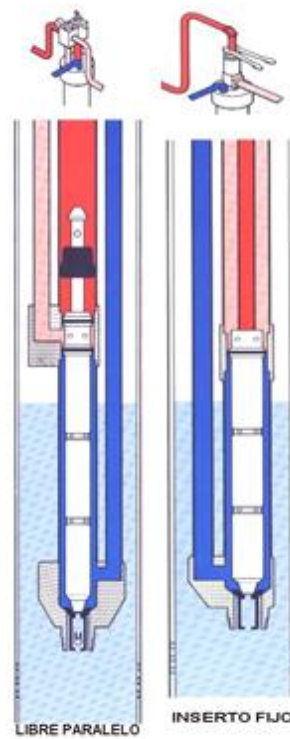
Dos sartas de tubería conectadas en el fondo por un bloque cruzado, son bajadas independiente o simultáneamente y una válvula fija retirable es insertada. La bomba libre es bajada por la tubería de mayor diámetro ayudado por el fluido de potencia el cual la coloca en un sello de asentamiento sobre la válvula fija y un sello superior en un collar especial. Continuando la circulación de aceite de potencia, la bomba comienza a operar. La producción y el fluido de potencia son expulsados a través del bloque cruzado, retorna por la sarta de tubería pequeña. El gas libre es producido a través del anular de la tubería del revestimiento.

### ***4.7.2.2 Bomba de Inserción Fija:***

En este sistema, la bomba de fondo del pozo es corrida en una sarta de tubería pequeña dentro de la tubería de producción. El fluido de potencia consumido baja por la sarta pequeña y la producción más el fluido de

potencia expulsado retorna por el anular de las dos sartas. El gas libre es producido a través del anular tubería - revestimiento de producción.

**Figura 13.** Configuraciones de Subsuelo



**Fuente:** JJ Tech. Hydraulic Jet Pumps, Disponible en Internet: <http://jitech.com/products/hydraulic-jet-pumps/> [modificada por los Autores]

## 5 FUNDAMENTOS DE DISEÑO EN EL BOMBEO HIDRÁULICO TIPO JET

### 5.1 INTRODUCCIÓN

En la industria del petróleo, la gran mayoría de bombas convencionales utilizadas, son operadas por medio del pistón de una bomba reciprocante de desplazamiento. Para el caso en estudio, la bomba jet no emplea partes móviles y realiza su acción de bombeo por medio del efecto Venturi<sup>2</sup>, donde la alta velocidad del fluido motriz se mezcla con la baja velocidad de los fluidos producidos, en una sección de área constante denominada cámara de mezclado o garganta (throat). Cuando el fluido de retorno, alcanza la parte final de la cámara de mezclado, tiene baja presión y alta velocidad. El fluido entonces sale de la bomba a través del difusor, para transformar la energía cinética en presión, la cual debería ser suficiente para levantar la tasa del fluido de retorno hasta superficie.

Como se observó en el primer capítulo las principales ventajas que presenta este tipo de bombeo hidráulico son: Tolerancia a fluidos de inyección y de producción de baja calidad, son adaptables para todos los arreglos de fondo de bombeo hidráulico tipo jet, se pueden operar a grandes profundidades y en general presentan gran flexibilidad para operar bajo diversas condiciones. Pese a estas funciones, no puede ser utilizada en todos los pozos, debido principalmente a dos requisitos: una presión de succión relativamente alta para evitar la cavitación y su baja eficiencia mecánica, lo que hace que requiera más potencia en superficie que la bomba hidráulica tipo pistón.

---

<sup>2</sup> MELO, Vinicio. Optimización de la geometría de la bomba hidráulica jet. En: Bombas Jet. 2010, p 2.

El fundamento tecnológico de la bomba tiene ya varios años. Bernoulli fue el primero en publicar su principio físico en su libro “Hydrodynamica” en 1738. El inyector fue inventado por el francés Henri Giffard en 1858. La teoría del bombeo fue desarrollada por J.M. Rankine en 1870. En 1933 Gosline y O’Brien realizaron el trabajo estándar que serviría como base para muchos otros autores, entre esos Cunningham.

## **5.2 TEORÍA GENERAL**

### **5.2.1 Fundamento Matemático**

Entre las variables de diseño se incluyen los tamaños de boquilla y garganta, la relación de sus áreas de flujo, al igual que las formas, los ángulos, longitudes, espaciamiento, acabados y materiales. Asumiendo que los componentes han sido optimizados por medio de pruebas, entonces las áreas de flujo y sus relaciones son de interés para propósitos aplicativos. A través de la selección de las áreas de flujo apropiadas y sus relaciones, se puede optimizar la configuración de la bomba para ajustarse a las condiciones del pozo.

Los tamaños de las boquillas y gargantas determinan las tasas de flujo mientras que la relación entre sus áreas de flujo, determinan el intercambio entre la cabeza de presión producida y la tasa de flujo. Por ejemplo, si se selecciona una garganta de tal manera que el área de la boquilla sea el 60% del área de la garganta, resultará una bomba con una cabeza de presión relativamente alta y de baja tasa. Hay una menor área alrededor del jet para fluidos del pozo que van a entrar, conllevando a menores tasas de producción, a comparación de la tasa de inyección del fluido motriz, y con la energía de la boquilla siendo transferida a una baja cantidad de producción harán que se generen altas cabezas de presión. Este tipo de bomba es ideal para pozos profundos con alto levantamiento.

Lo contrario ocurre si se selecciona una garganta donde el área de la boquilla sea el 20% del área de la garganta, aumentará el flujo de producción, pero como la energía de la boquilla está siendo transferida a una gran cantidad de producción, a comparación de la tasa del fluido motriz, se desarrollarán menores cabezas de presión. Los pozos someros con poco levantamiento son ideales para este tipo de bomba.

Cualquier número de combinaciones de áreas son ajustables a distintas combinaciones de flujo y levantamiento. Se han realizado intentos para producir bajas tasas de fluidos de pozo comparado con la tasa del fluido de potencia a una relación boquilla/garganta del 20%, esto sería ineficiente debido a pérdidas turbulentas de mezcla entre el jet de alta velocidad y la lenta producción. De manera viceversa ocurre a altas tasas de producción con una relación boquilla/garganta del 60%, de igual forma será ineficiente debido a las pérdidas por fricción a medida que el producido se mueve rápidamente a través de una garganta relativamente pequeña. La relación óptima se da encontrando un equilibrio entre las pérdidas del mezclado y las pérdidas por fricción.

También deben considerarse las características de cavitación. Las áreas de flujo de la garganta y la boquilla definen un pasaje de flujo anular a la entrada de la garganta. Entre más pequeña sea el área, mayor será la velocidad de un fluido producido pasando a través del sistema. La presión estática del fluido cae a medida que el cuadrado de la velocidad aumenta y alcanza la presión de vapor del fluido a altas velocidades. Esta baja presión puede causar que se formen cavidades de vapor, un proceso denominado cavitación. Los resultados son un flujo estrangulado entrando a la garganta, y a la presión de entrada de la bomba no hay más producción, inclusive aún, si se aumentan la tasa del fluido motriz y la presión. El colapso subsecuente de las cavidades de vapor a medida que aumenta la presión en la bomba puede causar erosión conocida como daño de cavitación. Por lo que para una tasa de producción dada y una presión de entrada, habrá un área de flujo anular mínima para evitar la cavitación.

### 5.3 REPRESENTACIÓN MATEMÁTICA

Cada fabricante de bomba hidráulica tipo jet ofrece un alto número de tamaños de boquilla y cinco o más gargantas para cada boquilla, y como no existe estandarización entre proveedores, el número de curvas de desempeño es alto. Esto es mucho más complicado por la variabilidad de curvas de desempeño posibles con distintas presiones de boquilla. Para simplificar esta situación se necesita una representación matemática unificadora.

Primero expuesto por Gosline y O'Brien y desarrollado luego por Cunnigham, es posible escribir una serie de ecuaciones que describan el desempeño de bombas geoméricamente similares. Si son escritas adimensionalmente aplicarán para todos los tamaños de bombas siempre y cuando el número de Reynolds que esté operando sea lo suficientemente alto, como para que los efectos de la viscosidad sean despreciables. Considerando las ecuaciones de energía y de momento para la boquilla, el pasaje de succión, garganta (tubo de mezclado) y un difusor derivan las ecuaciones que se presentan a continuación.

En la tabla 1 se define la nomenclatura de las ecuaciones que se revisarán. Al diseñar el sistema de bombeo hidráulico tipo jet, se deben satisfacer dos condiciones. La ecuación 1 se refiere a la tasa de fluido que puede bombearse a través de una boquilla de diámetro dado, para una determinada caída de presión. Esta condición se expresa mediante la ecuación:

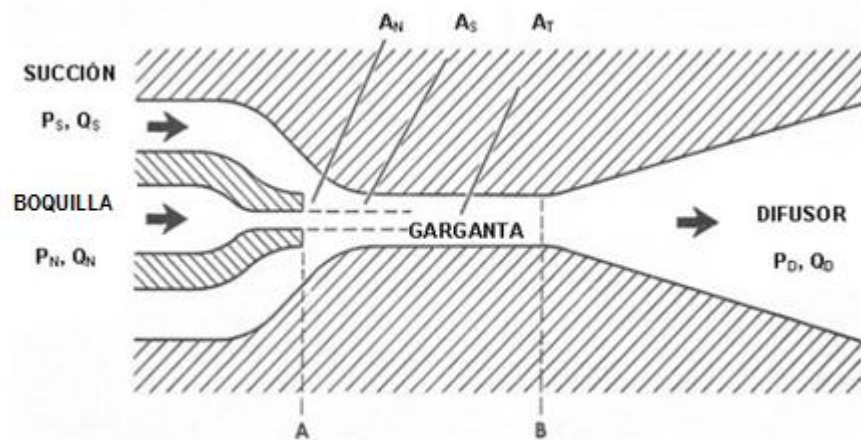
#### **Ecuación 1.** Tasa del fluido motriz

$$Q_N = 832 * A_N * \sqrt{\frac{P_N - P_S}{G_N}} \quad (1)$$

**Fuente:** SMART, Eddie. Jet Pump Geometry Selection. En: *Southwestern Petroleum Short Course*. 1985. p. 2.

La segunda condición se describe mediante las curvas de comportamiento adimensional que relacionan la presión de entrada a la boquilla  $P_N$ , la presión de succión de los fluidos del pozo  $P_S$ , y la presión de descarga de la bomba  $P_D$ , con la tasa que pasa a través de la boquilla  $Q_N$ , y la tasa de fluido producido que ingresa a la bomba  $Q_S$ , (Figura. 14). Dichas curvas se muestran en la Figura. 16 y se definen mediante la ecuación 2:

**Figura 14.** Esquema general bombeo hidráulico tipo jet



**Fuente:** MELO, Vinicio. Optimización de la geometría de la bomba hidráulica jet. En: Bombas Jet. 2010. p. 3.

**Ecuación 2.** Relación adimensional de recuperación de presión

$$H = \frac{NUM}{(1+K_N)-NUM} \quad (2)$$

**Fuente:** MELO, Vinicio. Optimización de la geometría de la bomba hidráulica jet. En: Bombas Jet. 2010. p. 3.

**Ecuación 3.** Variable usada para definir H

$$NUM = 2R + (1 - 2R) \left[ \frac{M * R}{1 - R} \right]^2 - (1 + K_{TD})R^2(1 + M)^2$$

**Fuente:** MELO, Vinicio. Optimización de la geometría de la bomba hidráulica jet. En: Bombas Jet. 2010. p. 3.

#### **Ecuación 4. Relación de Áreas**

$$R = \frac{A_N}{A_T} \quad (3)$$

**Fuente:** SMART, Eddie. Jet Pump Geometry Selection. En: *Southwestern Petroleum Short Course*. 1985. p. 2.

#### **Ecuación 5. Relación de flujo adimensional**

$$M = \frac{Q_S * G_S}{Q_N * G_N} \quad (4)$$

**Fuente:** SMART, Eddie. Jet Pump Geometry Selection. En: *Southwestern Petroleum Short Course*. 1985. p. 2.

#### **Ecuación 6. Relación adimensional de presiones**

$$H = \frac{P_D - P_S}{P_N - P_D} \quad (5)$$

**Fuente:** SMART, Eddie. Jet Pump Geometry Selection. En: *Southwestern Petroleum Short Course*. 1985. p. 2.

Las ecuaciones 1 y 2 involucran dos áreas, las cuales determinan el comportamiento de la bomba. En la ecuación 1, el área de la boquilla  $A_N$  se relaciona con la tasa de fluido motriz requerido  $Q_N$ . En la ecuación 2, el valor de  $R$  determina la forma de las curvas de comportamiento adimensional. La ecuación 3, expresa la relación de áreas  $R$ , entre el área de la boquilla y el área de la cámara de mezclado. Por lo que, dichas áreas son los parámetros a modificar, con la finalidad de encontrar la bomba óptima para las condiciones de producción del pozo.

Si se mantiene constante la relación de áreas  $R$ , se puede graficar en una curva la relación de presiones  $H$  vs la relación de flujo adimensional  $M$ .

**Tabla 1.** Nomenclatura ecuaciones de diseño bombeo hidráulico tipo jet

VARIABLE	DEFINICION
$A_N$	Área de flujo de la boquilla, $\text{in}^2$
$A_S$	Área anular de la cámara de mezclado para el fluido de producción, $\text{in}^2$
$A_T$	Área de flujo total de la cámara de mezclado, $\text{in}^2$
$D$	Profundidad vertical del pozo, ft
$D_1$	Diámetro interno de la tubería de producción o del revestimiento, $\text{in}$
$D_2$	Diámetro externo de la tubería interior en flujo anular, $\text{in}$
$F_W$	Fracción de agua de formación
$F_{WD}$	Fracción de agua del fluido de la columna de retorno
$P_{FN}$	Pérdidas de presión por fricción de la tubería, psi
$P_{FD}$	Pérdida de presión por fricción del fluido en el circuito de retorno, psi
$G_N$	Gradiente del fluido motriz en la tubería de inyección, psi/ft
$G_D$	Gradiente del fluido de la columna de retorno, psi/ft
$G_S$	Gradiente del fluido de formación, psi/ft
$G_O$	Gradiente del petróleo producido, psi/ft
$G_W$	Gradiente de agua, psi/ft
$H$	Relación adimensional de recuperación de presión
$HP$	Potencia, horsepower
$K_N$	Coefficiente de pérdidas de la boquilla
$K_{TD}$	Coefficiente de pérdidas combinado cámara de mezclado difusor
$L$	Longitud de la tubería de producción, ft
$M$	Relación de flujo adimensional, $q_3/q_1$
$M_L$	Relación de flujo adimensional en el límite de la cavitación

VARIABLE	DEFINICION
$NUM$	Variable usada para definir $H$
$P_N$	Presión a la entrada de la boquilla, psi
$P_D$	Presión de descarga, psi
$P_S$	Presión de succión, psi
$P_T$	Presión superficial de operación, psi
$P_F$	Perdidas de presión por fricción, psi
$P_{wh}$	Contrapresión en la línea de flujo, psi
$Q_N$	Tasa del fluido motriz, bbl/día
$Q_D$	Tasa del fluido producido + tasa fluido motriz, bbl/día
$Q_S$	Tasa del fluido producido, bbl/día
$R$	Relación de áreas es $A_N/A_T$
$GLR$	Relación Gas-Líquido, $ft^3/bbl$
$GOR$	Relación Gas-Petróleo, $ft^3/bbl$

Al cambiar el valor de  $R$  se puede generar otra curva como se ilustra en la figura 15. Analizando esta gráfica, se observa que para  $R = 0.6$  el valor de  $H$  es el más grande, si los valores de  $M$  son menores que 0.18, ya que en este punto se cruzan las curvas de  $R = 0.6$  y  $R = 0.5$ . A partir de este valor la curva de  $R = 0.5$  proporciona los valores de  $H$  más grandes, hasta intersecarse con la de  $R = 0.4$ , que ocurre para el valor de  $M = 0.33$ . Este comportamiento continúa a medida que el valor de  $R$  disminuye.

La ecuación 5 representa la relación de presiones,  $H$ , la cual se puede resolver para  $P_N$  de la siguiente manera:

### Ecuación 7. Presión a la entrada de la boquilla

$$P_N = \frac{P_D - P_s}{H} + P_D \quad (6)$$

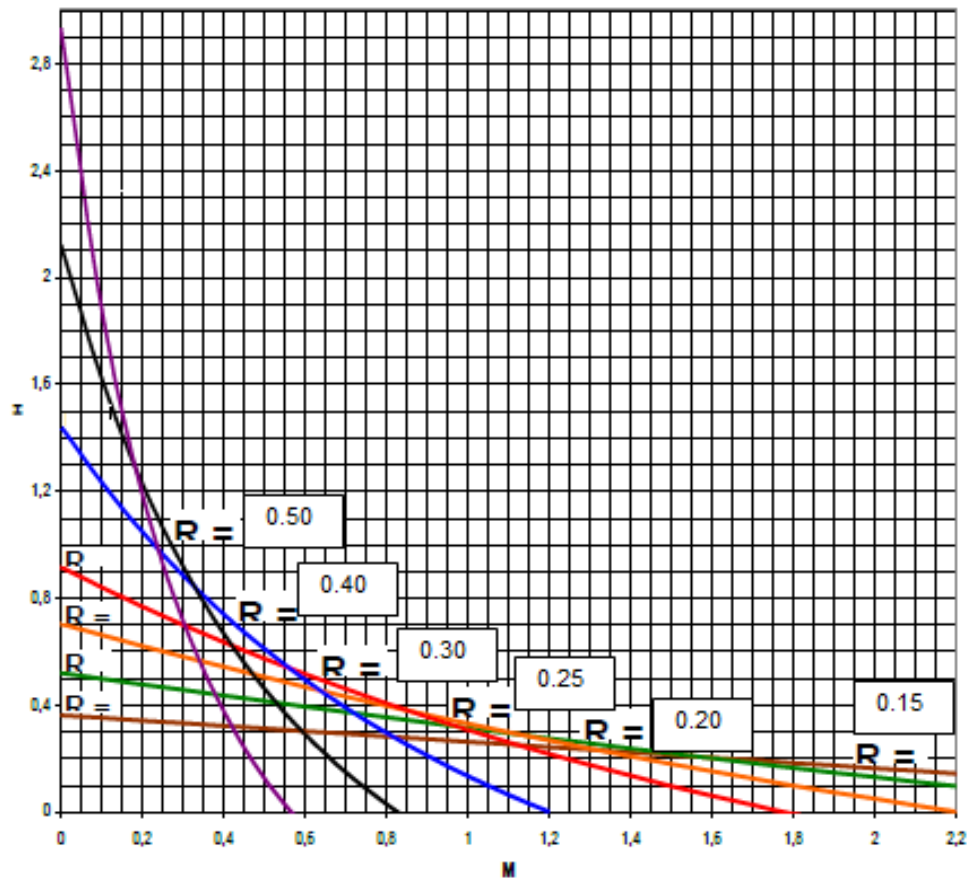
**Fuente:** SMART, Eddie. Jet Pump Geometry Selection. En: *Southwestern Petroleum Short Course*. 1985. p. 2.

El término  $P_N$  es una combinación de la presión de operación superficial, la presión hidrostática del fluido motriz y las pérdidas de presión del fluido motriz en la tubería.

En la ecuación 6 se puede observar que si permanecen constantes las presiones  $P_s$  y  $P_D$ , a medida que el valor de  $H$  aumenta, se reduce la presión  $P_N$ . Esto repercutiría en bajos valores de la presión de operación superficial y bajos requerimientos de potencia.

Si se relaciona esta observación con la Figura 15, esto significa que para un valor dado de  $M$ , la curva que proporcionará la menor presión de operación será aquella que tenga el más alto valor de  $H$ . Con base en esto, se podría usar una Curva de Comportamiento de Diseño como la mostrada en la Figura 16, compuesta por los segmentos de línea que representan los máximos valores de  $H$ , en las curvas de la Figura 15. Es decir, que la curva de comportamiento de diseño es la envolvente superior de las curvas de la Figura 15.

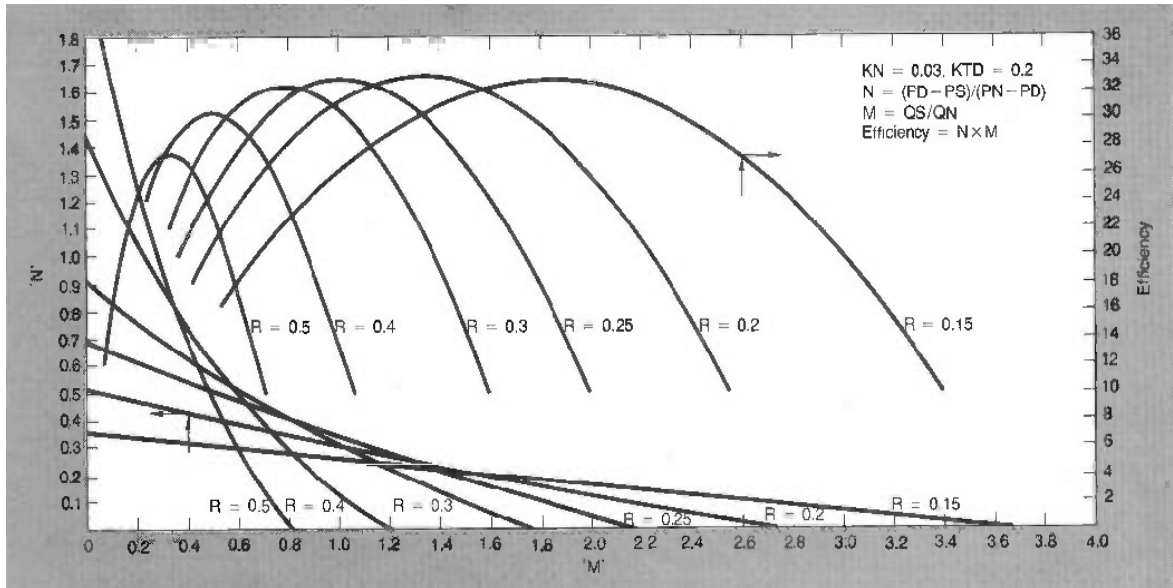
**Figura 15.** Valores máximos de  $H$



**Fuente:** MELO, Vinicio. Optimización de la geometría de la bomba hidráulica jet. En: Bombas Jet. 2010. p. 4.

La curva de comportamiento de diseño se puede utilizar como si fuera la curva de comportamiento de una sola bomba, para calcular la relación de presiones  $H$  y la relación de flujo adimensional  $M$ , que sea consistente con la descripción del pozo y la curva de IPR. Para calcular la geometría óptima de la bomba se debe especificar la presión de operación superficial deseada. Como regla general, la mayor eficiencia se obtiene con la mayor presión de operación superficial, debido a que se requiere una menor tasa de fluido motriz y como consecuencia se tiene menores pérdidas de presión por fricción en la tubería.

**Figura 16.** Curvas de Desempeño Adimensional



**Fuente:** PETRIE, Hal; WILSON, Phil; SMART, Eddie. Jet Pumping Oil Wells. En: World Oil. November-December 1983. p. 4.

Para los valores de  $M$  y  $H$  obtenidos habrá una relación de áreas,  $R$ , de la curva de desempeño correspondiente a esos valores. Debido a que ésta es la solución para una tasa de producción y una presión de fondo fluyente dadas, entonces el valor de  $M$  junto con el de la producción deseada, se pueden utilizar para calcular la tasa de fluido motriz, así como la presión de fondo de éste a la entrada de la boquilla,  $P_N$ . Con esta información se podrá utilizar la ecuación 1 para calcular el área exacta de la boquilla, para que la tasa obtenida del fluido motriz pase a través de ella.

El objetivo al seleccionar la geometría óptima de la bomba tipo jet es: primero, escoger la bomba que levante el fluido con los menores requerimientos de potencia y segundo, que no exista cavitación en la bomba. La cavitación ocurriría en la bomba cuando la presión estática del fluido producido dentro de la cámara de mezclado sea menor que la presión de saturación del fluido producido. Al ocurrir la cavitación

la cámara de mezclado puede resultar dañada, por lo que es necesario seleccionar otra bomba, la cual aunque requiera mayor potencia HP, evitaría dichos daños.

Los límites para la cavitación en la bomba se pueden predecir mediante modelos matemáticos, teóricos o utilizando pruebas de laboratorio para establecer las constantes de dichas ecuaciones. La ecuación 7 representa la relación de flujo adimensional en el límite de la cavitación. Cuando la relación de flujo adimensional es mayor que la relación de flujo adimensional en el límite de cavitación, esta puede provocar daño a la bomba

Ecuación de la relación de flujo adimensional en el límite de cavitación:

**Ecuación 8.** Relación adimensional de flujo en el límite de la cavitación

$$M_L = \frac{(1 - R)}{R} \sqrt{\frac{P_S}{1,3(P_N - P_S)}}$$

**Fuente:** SMART, Eddie. Jet Pump Geometry Selection. En: *Southwestern Petroleum Short Course*. 1985. p. 5.

### 5.3.1 Secuencia de cálculo

A continuación se presenta la secuencia de pasos para el cálculo, propuesta por Smart<sup>3</sup> para determinar la geometría óptima de la bomba jet:

1. Fijar la presión de operación superficial deseada,  $P_T$ .
2. Como valor inicial suponer una relación de flujo adimensional igual a 1. Este es utilizado únicamente para calcular las pérdidas de presión por fricciones iniciales.
3. Calcular el gradiente de presión del petróleo producido a partir de su gravedad API.

---

<sup>3</sup> SMART, Eddie. Jet Pump Geometry Selection. En: *Southwestern Petroleum Short Course*. 1985.

### Ecuación 9. Gradiente del petróleo producido

$$G_o = \frac{0,433 * 141,5}{131,5 + API}$$

**Fuente:** SMART, Eddie. Jet Pump Geometry Selection. En: *Southwestern Petroleum Short Course*. 1985. p. 3.

4. Calcular el gradiente de presión del fluido producido, basado en los gradientes de petróleo y agua.

### Ecuación 10. Gradiente del fluido de formación

$$G_s = F_w * G_w + F_o * G_o$$

$$\text{Donde: } F_o = 1 - F_w$$

**Fuente:** SMART, Eddie. Jet Pump Geometry Selection. En: *Southwestern Petroleum Short Course*. 1985. p. 3.

5. Estimar el factor de volumen de formación para el petróleo y el agua.

### Ecuación 11. Factor volumétrico de formación

$$B_T = \left[ 1 + 2,8 \left( \frac{GOR}{P_{wh}} \right)^{1,2} \right] * (F_o) + F_w$$

**Fuente:** SMART, Eddie. Jet Pump Geometry Selection. En: *Southwestern Petroleum Short Course*. 1985. p. 4.

6. Calcular la tasa del fluido motriz, con base en la producción deseada y la relación de flujo adimensional,  $M$ .

### Ecuación 12. Tasa del fluido motriz

$$Q_N = \frac{G_s * Q_s * B_T}{G_N * M}$$

Donde:  $G_N =$  Gradiente del fluido motriz que pasa a través de la boquilla

**Fuente:** SMART, Eddie. Jet Pump Geometry Selection. En: *Southwestern Petroleum Short Course*. 1985. p. 4.

7. Utilizando la ecuación:

**Ecuación 13.** Pérdidas de presión por fricción del fluido motriz

$$P_{FN} = \left[ \frac{2,02 * 10^{-6} * L * ((D_1 + D_2) * \mu)^{0,21}}{C * GN^{0,21}} \right] * GN * QN^{1,79}$$

**Fuente:** SMART, Eddie. Jet Pump Geometry Selection. En: *Southwestern Petroleum Short Course*. 1985. p. 4.

**Ecuación 14.** Numero adimensional para el cálculo de pfn y pfd

$$C = (D_1 - D_2)(D_1^2 - D_2^2)^2 \left( \frac{D_1}{D_1 - D_2} \right)^{0,1}$$

**Fuente:** SMART, Eddie. Jet Pump Geometry Selection. En: *Southwestern Petroleum Short Course*. 1985. p. 4.

Calcular las pérdidas de presión por fricción en la tubería por la que fluye el fluido motriz, ya sea a través de una sección anular o circular, y considerar que:

**Ecuación 15.** Pérdida de presión por fricción del fluido motriz

$$P_{FN} = \text{Pérdida de presión por fricción del fluido motriz}$$

**Fuente:** SMART, Eddie. Jet Pump Geometry Selection. En: *Southwestern Petroleum Short Course*. 1985. p. 4.

**Ecuación 16.** Pérdida de presión por fricción del fluido de retorno

$$P_{FD} = \text{Pérdida de presión por fricción del fluido de retorno}$$

**Fuente:** SMART, Eddie. Jet Pump Geometry Selection. En: *Southwestern Petroleum Short Course*. 1985. p. 4.

8. Calcular la presión del fluido motriz en la boquilla  $P_N$ , como la suma de la presión de operación más la presión hidrostática del fluido motriz, menos la pérdida de presión por fricción de éste, en la tubería.

**Ecuación 17.** Presión del fluido motriz en la boquilla

$$P_N = P_T + G_N * D - P_{FN}$$

**Fuente:** SMART, Eddie. Jet Pump Geometry Selection. En: *Southwestern Petroleum Short Course*. 1985. p. 4.

9. Calcular la tasa del fluido de retorno  $Q_D$ , como la suma de la tasa de producción y la tasa del fluido motriz.

**Ecuación 18.** Tasa del fluido de retorno

$$Q_D = Q_N + Q_S$$

**Fuente:** SMART, Eddie. Jet Pump Geometry Selection. En: *Southwestern Petroleum Short Course*. 1985. p. 4.

10. Calcular el gradiente del fluido de retorno  $G_D$ , como un promedio ponderado del gradiente del fluido motriz y el gradiente del fluido producido.

**Ecuación 19.** Gradiente del fluido de retorno

$$G_D = \frac{G_S * Q_S + G_N * Q_N}{Q_D}$$

**Fuente:** SMART, Eddie. Jet Pump Geometry Selection. En: *Southwestern Petroleum Short Course*. 1985. p. 4.

11. Calcular la fracción de agua del fluido de retorno  $F_{WD}$ , dependiendo si el fluido motriz es petróleo o agua, con las siguientes ecuaciones:

- Si el fluido motriz es petróleo:

**Ecuación 20.** Fracción de agua del fluido de retorno

$$F_{WD} = \frac{Q_S * F_W}{Q_D}$$

**Fuente:** MELO, Vinicio. Optimización de la geometría de la bomba hidráulica jet. En: Bombas Jet. 2010. p. 8.

- Si el fluido motriz es agua:

**Ecuación 21.** Fracción de agua del fluido de retorno

$$F_{WD} = \frac{Q_{N+Q_S} * F_W}{Q_D}$$

**Fuente:** MELO, Vinicio. Optimización de la geometría de la bomba hidráulica jet. En: Bombas Jet. 2010. p. 8.

12. Determinar la relación gas – líquido del fluido de retorno  $GLR$ .

**Ecuación 22.** Relación gas-líquido

$$GLR = \frac{Q_S * F_W * GOR}{Q_D}$$

**Fuente:** SMART, Eddie. Jet Pump Geometry Selection. En: *Southwestern Petroleum Short Course*. 1985. p. 5.

13. Determinar la viscosidad del fluido de retorno  $\mu_D$ , como un promedio ponderado de las viscosidades del agua y del petróleo.

**Ecuación 23.** Viscosidad fluido de retorno

$$\mu_D = F_{WD} * \mu_W + (1 - F_{WD}) * \mu_O$$

**Fuente:** SMART, Eddie. Jet Pump Geometry Selection. En: *Southwestern Petroleum Short Course*. 1985. p. 5.

14. Determinar la presión de descarga de la bomba  $P_D$ , como la suma de la presión hidrostática del fluido de retorno, la caída de presión por fricción en el conducto de retorno y la contrapresión en la cabeza del pozo. Si la  $GLR$  es menor que  $10 \text{ ft}^3/\text{bbl}$ , determinar  $P_{FD}$  con la ecuación 22.

**Ecuación 24.** Presión de descarga de la bomba

$$P_D = P_{WH} + G_D * D + P_{FD}$$

**Fuente:** SMART, Eddie. Jet Pump Geometry Selection. En: *Southwestern Petroleum Short Course*. 1985. p. 5.

Si la  $GLR$  es mayor o igual que  $10 \text{ ft}^3/\text{bbl}$ , se debe utilizar una correlación adecuada para flujo multifásico.

15. Calcular un nuevo valor de la relación de presiones  $H$ , mediante la ecuación 5.

**Ecuación 25.** Relación adimensional de recuperación de presiones

$$H = \frac{P_D - P_S}{P_N - P_D}$$

**Fuente:** SMART, Eddie. Jet Pump Geometry Selection. En: *Southwestern Petroleum Short Course*. 1985. p. 5.

16. Basado en este valor de  $H$  y la Figura 16, se determina la relación de áreas óptima,  $R$ .

17. Utilizando la curva de comportamiento de diseño de la Figura 16, se encuentra un nuevo valor para  $M$  correspondiente al valor de  $H$  del paso 15. También se puede utilizar la siguiente ecuación para calcular  $M$ , usando el valor de  $R$  obtenido en el paso anterior.

**Ecuación 26.** Relación adimensional de flujo

$$M = \frac{C_3 - \sqrt{C_2 * C_3 + C_3 * C_1 - C_2 * C_1 + \frac{C_4(C_2 - C_3)H}{H+1}}}{C_2 - C_3}$$

**Fuente:** MELO, Vinicio. Optimización de la geometría de la bomba hidráulica jet. En: *Bombas Jet*. 2010. p. 9.

**Ecuación 27.** Número adimensional 1

$$C_1 = 2R$$

**Fuente:** MELO, Vinicio. Optimización de la geometría de la bomba hidráulica jet. En: Bombas Jet. 2010. p. 9.

**Ecuación 28.** Número adimensional 2

$$C_2 = \frac{(1 - 2R)R^2}{(1 - R)^2}$$

**Fuente:** MELO, Vinicio. Optimización de la geometría de la bomba hidráulica jet. En: Bombas Jet. 2010. p. 9.

**Ecuación 29.** Número adimensional 3

$$C_3 = (1 + K_{TD})R^2$$

**Fuente:** MELO, Vinicio. Optimización de la geometría de la bomba hidráulica jet. En: Bombas Jet. 2010. p. 9.

**Ecuación 30.** Número adimensional 4

$$C_4 = 1 + K_N$$

**Fuente:** MELO, Vinicio. Optimización de la geometría de la bomba hidráulica jet. En: Bombas Jet. 2010. p. 9.

**Ecuación 31.** Coeficiente de pérdidas combinado cámara de mezclado difusor

$$K_{TD} = 0,20$$

**Fuente:** MELO, Vinicio. Optimización de la geometría de la bomba hidráulica jet. En: Bombas Jet. 2010. p. 9.

**Ecuación 32.** Coeficiente de pérdidas de la boquilla

$$K_N = 0,20$$

**Fuente:** MELO, Vinicio. Optimización de la geometría de la bomba hidráulica jet. En: Bombas Jet. 2010. p. 9.

Sí en el paso número 20 se determina la existencia de cavitación, se recomienda usar el valor de  $R$  determinado en el paso 16. En vez de usar la Figura 16, se puede utilizar la ecuación 20.

18. Comparar el nuevo valor de  $M$  con el anterior, si la variación de  $M$  es menor del 1%, se considera que se ha obtenido la convergencia y se continúa en el paso 19. Caso contrario regresar al paso 6 usando el nuevo valor de  $M$ .

19. Calcular la relación de flujo adimensional en el límite de cavitación,  $M_L$ , con la ecuación 7.

**Ecuación 33.** Relación de flujo adimensional en el límite de la cavitación

$$M_L = \frac{(1 - R)}{R} \sqrt{\frac{P_S}{1,3(P_N - P_S)}}$$

**Fuente:** SMART, Eddie. Jet Pump Geometry Selection. En: *Southwestern Petroleum Short Course*. 1985. p. 5.

20. Si  $M < M_L$ , no existe problema de cavitación, en tal caso continuar en el paso 24. Si  $M > M_L$ , entonces se tendrán problemas de cavitación, por lo que se requiere un ajuste y continuar en el paso siguiente.

21. Fijar  $M = M_L$  y utilizar el valor de la relación de áreas seleccionada para calcular un nuevo valor de la relación de presiones  $H$ . El valor de  $R$  se debe mantener constante en los cálculos para evitar cavitación.

22. Se calcula la presión de operación superficial requerida para evitar la cavitación:

### Ecuación 34. Presión superficial de operación

$$P_T = \frac{P_D - P_S}{H} + P_D - G_N * D + P_{FN}$$

**Fuente:** SMART, Eddie. Jet Pump Geometry Selection. En: *Southwestern Petroleum Short Course*. 1985. p. 6.

23. Repetir los cálculos para evitar cavitación, regresando al paso 5.

24. Determinar el área de la boquilla requerida para manejar la tasa de fluido motriz calculada en el paso 6, despejando  $A_N$  de la ecuación 1.

### Ecuación 35. Área de flujo de la boquilla

$$A_N = \frac{Q_N}{832 \sqrt{\frac{P_N - P_S}{G_N}}}$$

**Fuente:** SMART, Eddie. Jet Pump Geometry Selection. En: *Southwestern Petroleum Short Course*. 1985. p. 6.

La relación de áreas encontrada en el paso 16 junto con el área de la boquilla del paso 24 define la geometría óptima de la bomba tipo jet, para la presión de operación superficial dada. Esta área de la boquilla es la medida ideal requerida para que el volumen calculado del fluido motriz pase a través de ella. Generalmente el diámetro exacto de la boquilla no es el comercial y no se encuentra disponible, por lo que se selecciona el diámetro disponible más cercano, así como la cámara de mezclado que combina con esta boquilla comercialmente disponible, para obtener la relación de áreas óptima.

## 5.4 FABRICANTES DE BOMBAS HIDRÁULICAS TIPO JET

Algunos fabricantes de bombas tipo pistón se dedican también a la elaboración de bombas jet, las geometrías que presentan estos fabricantes son muy similares variando simplemente la forma en que los fluidos son circulados dentro y fuera de la sección de trabajo.

Los pozos con el sistema de levantamiento por bombeo hidráulico tipo jet poseen geometrías de bombas jet primordialmente de las siguientes marcas:

- Kobe
- National
- Guiberson
- Claw

Kobe y National aumentan sus áreas de boquillas y gargantas en una progresión geométrica. El factor de Kobe es de  $10^m=1.29155$  y el factor de National es  $4/\pi=1.27321$ . El sistema de tamaños ofrecida por Guiberson emplea un concepto de progresión geométrica similar, pero no utiliza el mismo factor en el rango total. En tamaños más pequeños, donde el cambio de la potencia por tamaño es bajo, la tasa de aumento áreal es más rápida que para los sistemas Kobe, National y Claw. Para valores de potencias mayores, el porcentaje incremental de tamaño es menor que para los sistemas Kobe, National y Claw para limitar el incremento en la potencia. Los tamaños ofrecidos por Guiberson cubren un rango ligeramente mayor que los otros fabricantes. La Tabla 2 contiene los tamaños de boquillas y gargantas de cada uno de los fabricantes mencionados.

Existen otras marcas menos reconocidas como Oilwell y PackerCo, de lo que sepuede mencionar que los tamaños de boquillas y gargantas que presenta Oilwell son similares a los de Kobe y los de PackerCo son similares a los de Guiberson.

Las estrictas progresiones empleadas por Kobe y National establecieron relaciones de áreas fijas entre las boquillas y gargantas. Una boquilla dada que se utilice con el mismo número de garganta, siempre dará la misma relación de área (0.383 para el sistema de National y 0.400 para el Sistema de Kobe). Esta relación se conoce como relación A. Gargantas sucesivamente más grandes usadas con una boquilla dada, dan las relaciones B, C, D y E. Para ambos sistemas la dimensión de la bomba esta designada por el número de la boquilla y la letra de la relación de áreas.

Ya que la progresión de dimensiones para boquillas y cámaras de mezclado en el sistema Guiberson no es constante sobre el rango total, las combinaciones boquilla-garganta no dan relaciones de áreas fijas. Sin embargo, las relaciones que resultan cubren el mismo rango básico de los otros tres sistemas.

**Tabla 2.** Áreas boquillas y gargantas para cuatro fabricantes distintos

TAMAÑOS DE BOQUILLAS Y GARGANTAS DE BOMBAS JET															
KOBE				NATIONAL				GUIBERSON				CLAW			
Boquilla		Garganta		Boquilla		Garganta		Boquilla		Garganta		Boquilla		Garganta	
No.	Área (in <sup>2</sup> )	No.	Área (in <sup>2</sup> )	No.	Área (in <sup>2</sup> )	No.	Área (in <sup>2</sup> )	No.	Área (in <sup>2</sup> )	No.	Área (in <sup>2</sup> )	No.	Área (in <sup>2</sup> )	No.	Área (in <sup>2</sup> )
1	0,0024	1	0,0060	1	0,0024	1	0,0064	DD	0,0016	000	0,0044	1	0,0018	A	0,0046
2	0,0031	2	0,0077	2	0,0031	2	0,0081	CC	0,0028	00	0,0071	2	0,0030	B	0,0072
3	0,0040	3	0,0100	3	0,0039	3	0,0104	BB	0,0038	0	0,0104	3	0,0038	C	0,1040
4	0,0052	4	0,0129	4	0,0050	4	0,0131	A	0,0055	1	0,0143	4	0,0054	D	0,0142
5	0,0067	5	0,0167	5	0,0064	5	0,0167	A+	0,0075	2	0,0189	5	0,0074	E	0,0187
6	0,0086	6	0,0215	6	0,0081	6	0,0212	B	0,0095	3	0,0241	6	0,0094	F	0,0239
7	0,0111	7	0,0278	7	0,0103	7	0,0271	B+	0,0109	4	0,0314	7	0,0108	G	0,0311
8	0,0144	8	0,0359	8	0,0131	8	0,0346	C	0,0123	5	0,0380	8	0,0122	H	0,0376
9	0,0186	9	0,0464	9	0,0167	9	0,0441	C+	0,0149	6	0,0452	9	0,0148	I	0,0447
10	0,0240	10	0,0599	10	0,0212	10	0,0562	D	0,0177	7	0,0531	10	0,0175	J	0,0526
11	0,0310	11	0,0774	11	0,0271	11	0,0715	E	0,0241	8	0,0661	11	0,0239	K	0,0655
12	0,0400	12	0,1000	12	0,0346	12	0,0910	F	0,0314	9	0,0804	12	0,0311	L	0,0796
13	0,0517	13	0,1292	13	0,0441	13	0,1159	G	0,0452	10	0,0962	13	0,0450	M	0,0957
14	0,0668	14	0,1668	14	0,0562	14	0,1459	H	0,0661	11	0,1195	14	0,0658	N	0,1119
15	0,0863	15	0,2154	15	0,0715	15	0,1879	I	0,0855	12	0,1452	15	0,0851	O	0,1445
16	0,1114	16	0,2783	16	0,0910	16	0,2392	J	0,1257	13	0,1772	16	0,1251	P	0,1763
17	0,1439	17	0,3594	17	0,1159	17	0,3046	K	0,1590	14	0,2165	17	0,1552	Q	0,2154
18	0,1858	18	0,4642	18	0,1476	18	0,3878	L	0,1963	15	0,2606	18	0,1950	R	0,2593
19	0,2400	19	0,5995	19	0,1873	19	0,4938	M	0,2453	16	0,3127	19	0,2464	S	0,3127
20	0,3100	20	0,7743	20	0,2392	20	0,6287	N	0,3117	17	0,3750	20	0,3119	T	0,3760
		21	1,0000					P	0,3848	18	0,4513	21	0,3821	U	0,4515
		22	1,2916							19	0,5424			V	0,5426
		23	1,6681							20	0,6518			W	0,6520
		24	2,1544												

## 5.5 RELACIÓN DE RENDIMIENTO DE INFLOW (*IPR*)

El *IPR* para un pozo es la relación entre la tasa de flujo dentro de la cara del pozo y la presión fluyendo en la cara de pozo,  $P_{wf}$ . El *IPR* se ilustra haciendo una gráfica de  $P_{wf}$  vs  $Q$ . Si el *IPR* puede ser representado por un índice de productividad constante  $J$ , la gráfica será lineal. Si el valor de  $J$  cambia, la pendiente del *IPR* cambiará y no existirá una relación lineal entre  $P_{wf}$  y  $Q$ .

Los principales factores que afectan el *IPR* para yacimiento de petróleo son:

- Una disminución en  $K_{ro}$  a medida que la saturación de gas aumenta.
- Un incremento en la viscosidad del aceite a medida que la presión disminuye y el gas es liberado.
- Aumento del factor volumétrico de formación.
- El daño a la formación.
- Incremento en la turbulencia.

### 5.5.1 Método de Sukamo<sup>4</sup>

Un pozo cañoneado penetra una formación y cada disparo o carga penetra la formación con la longitud de  $L_p$ , medida desde la cara de la arena. La carga de cañoneo produce un radio  $r_p$ . La zona alrededor del cañoneo, causada por la bala, tiene un radio  $r_c$ , medida desde el centro de la perforación. Desde la cara de la formación hasta la punta del disparo, se asume que el radio de perforación y la zona destruida son la misma. Pérez y Kelkar derivan el flujo de dos fases en el cañoneo

---

<sup>4</sup> SUKAMO, P., "Inflow Performance Relationship Curves in Two- Phase and Three-Phase Flow Conditions" EN: Inflow Performance Relationship PhD Dissertation, The University of Tulsa, 1986.

analíticamente, basándose en la geometría de la perforación mencionada anteriormente y siguiendo las suposiciones expuestas a continuación:

- El flujo es de estado estable e isotérmico.
- El flujo es perpendicular a la longitud de la perforación.
- El gas y el aceite fluyen simultáneamente en el cañoneo.
- La tasa de flujo en cada cañoneo es la misma, esto es la tasa total dividida por el número de las perforaciones.
- La presión en el límite exterior de la zona cañoneada es constante.
- La permeabilidad relativa de la zona triturada es función de la saturación, es igual que la permeabilidad relativa de la formación.
- El efecto de la gravedad y de la presión capilar son despreciables.

Las suposiciones de la ecuación de Pérez y Kelkar son muy similares a las hechas por un simulador de un pozo radial de tres fases.

#### **5.5.1.1 Desarrollo de la Ecuación:**

El modelo matemático se ha corrido para un amplio rango de datos de propiedades de roca, fluidos y también para distintos tamaños de reservorios y cañoneos. Para un set de datos, y cierta presión de yacimiento, la relación entre la presión fluyente de la cara de la arena y la tasa de flujo de aceite son calculadas. Al aplicar la ecuación de Pérez y Kelkar para un cierto diámetro, longitud y número de disparos, se puede calcular la caída de presión a través de los mismos. Luego, la presión de fondo fluyente puede calcularse al sustraer la presión fluyente de la cara de la formación con la caída de presión a través de las perforaciones.

La gráfica estilo Vogel<sup>5</sup>, es una gráfica entre la relación de la tasa de flujo de aceite a la máxima tasa de flujo del aceite ( $Q_o/Q_{m\acute{a}x}$ ) con la relación de presión de fondo fluyente a la presión de reservorio ( $P_{wf}/P_r$ ), para representar la relación de

---

<sup>5</sup> VOGEL, J.V., "Inflow Performance Relationship for Solution Gas Drive Wells", *Journal of Petroleum Technology*, January 1968.

rendimiento de influjo en pozos cañoneados.  $Q_{m\acute{a}x}$  es la máxima tasa de flujo a condiciones de hueco abierto.

Basándonos en los resultados de los cálculos, se pueden plantear las siguientes conclusiones:

- Para una densidad de caoneo mayor a 12 SPF, la caída de presión de la perforación puede despreciarse, y el pozo se desempeñara como a hueco abierto.
- Para los rangos de los radios de caoneo,  $r_p$ , como los mostrados en la tabla, el efecto de la longitud de penetración es despreciable.

Las curvas de  $IPR$  obtenidas del modelo se han agrupado basándose en la técnica de caoneo y en el radio de caoneo. Un análisis de regresión se ha corrido para los datos de cada grupo, obteniendo la siguiente ecuación:

**Ecuación 36.** Curva  $IPR$

$$\frac{Q_o}{Q_{max}} = a_0 + a_1 \left( \frac{P_{wf}}{P_r} \right) + a_2 \left( \frac{P_{wf}}{P_r} \right)^2$$

**Fuente:** SUKAMO, P., "Inflow Performance Relationship Curves in Two- Phase and Three-Phase Flow Conditions" PhD Dissertation, The University of Tulsa, 1986, p. 2.

Dónde:

-  $a_0, a_1$  y  $a_2$  son constantes que dependen del radio dejado por la carga de caoneo y de la densidad del caoneo, como se muestra en la Tabla 3 y 4.

-  $Q_{max}$  es la tasa de producción máxima sin caoneo.

Usando una sola presión y datos de una prueba de producción y aplicando la ecuación 34 a los datos, puede predecirse la curva del  $IPR$  de un pozo caoneado produciendo desde un yacimiento de gas en solución.

**Tabla 3.** Constantes para la ecuación 34 (Perforación Overbalanced)

$r_p, in$	SPF	$a_0$	$a_1$	$a_2$
>0.30	16	0.91995	0.08072	-0.97117
	12	0.90482	0.08881	-0.96534
	8	0.87333	0.10715	-0.98364
	4	0.77503	0.12529	-0.87781
	2	0.61710	0.26632	-0.86983
$\leq 0.30$	16	0.83925	0.12038	-0.93283
	12	0.79505	0.14935	-0.91988
	8	0.73507	0.11547	-0.82687
	4	0.57857	0.09956	-0.65332
	2	0.33247	0.20784	-0.52487

**Fuente:** SUKAMO, P., "Inflow Performance Relationship Curves in Two- Phase and Three-Phase Flow Conditions" PhD Dissertation, The University of Tulsa, 1986, p.3.

**Tabla 4.** Constantes para la ecuación 34 (Perforación Underbalanced)

$r_p, in$	SPF	$a_0$	$a_1$	$a_2$
$\geq 0.19$	16	0.95146	0.06546	-0.98175
	12	0.93806	0.05464	-0.95875
	8	0.92006	0.05473	-0.94102
>0.30	4	0.91196	0.07855	-0.95974
	2	0.85540	0.06302	-0.88678
$\leq 0.30$	4	0.79507	0.15189	-0.91899
	2	0.64374	0.22082	-0.83782

**Fuente:** SUKAMO, P., "Inflow Performance Relationship Curves in Two- Phase and Three-Phase Flow Conditions" PhD Dissertation, The University of Tulsa, 1986, p. 3.

## 6 FUNDAMENTACIÓN ALGORÍTMICA DE LA HERRAMIENTA SOFTWARE

### 6.1 INTRODUCCIÓN

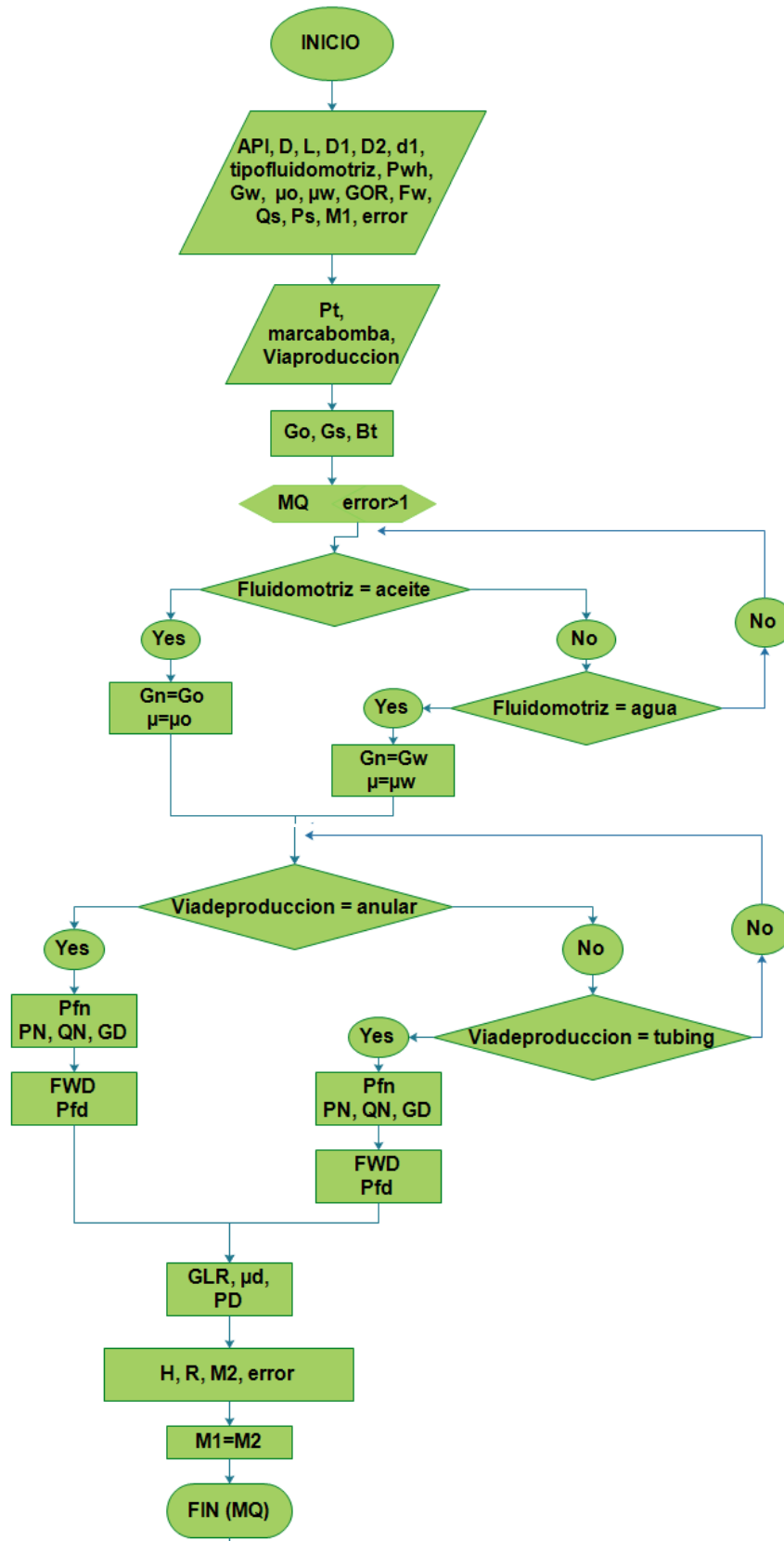
En este proyecto de grado se decidió trabajar con MATLAB debido a su amplio soporte matemático, su alta precisión, un amplio soporte de funciones ya desarrolladas, presenta una integración con dispositivos hardware, un magnifico panel de Ayuda.

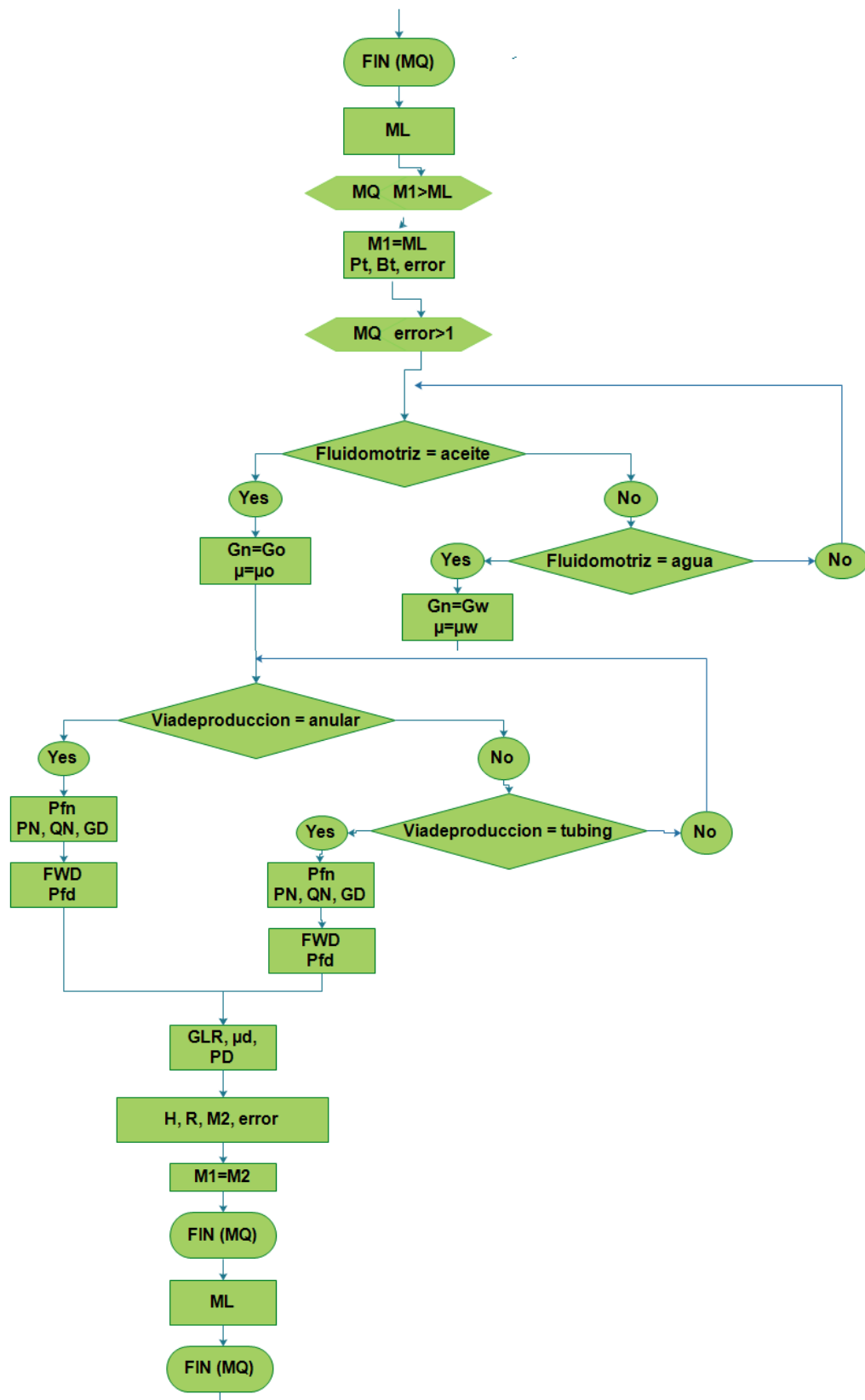
Es importante destacar que MATLAB está disponible casi desde sus inicios para un gran número de ambientes tales como *Sun, Apollo, Vaxstation, HP Workstation, VAX, MicroVAX, GOULD, PC, y Apple Macintosh.*

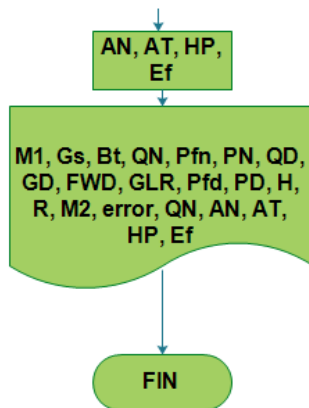
Para realizar la optimización la geometría del bombeo hidráulico tipo JET,  $A_N$  y  $A_T$  se requiere realizar una serie de pasos que involucran diferentes variables del procedimiento, entre las que se destacan: profundidad vertical del pozo ( $D$ ), longitud del tubing de producción. hasta la bomba o profundidad de la bomba ( $L$ ), diámetro interno de la tubería de producción o del revestimiento ( $D1$ ), diámetro externo de la tubería interior en flujo anular ( $D2$ ), tipo de fluido motriz, contrapresión en la línea de flujo ( $P_{wh}$ ), gradiente del agua de formación ( $G_w$ ), viscosidad del crudo ( $\mu_o$ ), viscosidad del agua ( $\mu_w$ ), Relación gas petróleo ( $GOR$ ), fracción del agua de formación ( $F_w$ ), tasa de fluido producido ( $Q_s$ ), presión de succión ( $P_s$ ), presión superficial de producción ( $P_T$ ), relación de flujo adimensional ( $M1$ ), marca de la bomba, vía de producción, entre otros.

A continuación se explica el diagrama de flujo diseñado específicamente para esta herramienta:

## 6.2 DIAGRAMA DE FLUJO







### PASO A:

Inicialmente se requiere fijar la presión de operación superficial deseada (presión de la bomba triplex), se selecciona un valor para la relación de flujo adimensional ( $M$ ) el cual permite realizar el cálculo de la geometría óptima para la bomba Jet teniendo en cuenta el gradiente del petróleo producido ( $G_o$ ), el gradiente del fluido de formación ( $G_s$ ) y el factor volumétrico de formación ( $B_t$ ).

Este  $M$  seleccionado se fija como  $M_1$ , a continuación se calcula el gradiente de presión del crudo a partir de su gravedad API ( $G_o$ ), luego se procede a calcular el gradiente de presión del fluido producido teniendo en cuenta el gradiente de presión del agua y del crudo ( $G_s$ ). A partir de estos cálculos se estima el factor volumétrico de formación para el crudo y para el agua ( $B_t$ ).

### PASO B:

Si el fluido motriz es crudo se fija el gradiente del fluido motriz y la viscosidad con el gradiente y la viscosidad de crudo ( $G_o = G_M$ ) ( $\mu_o = \mu$ ), si el fluido motriz es agua se fija como el gradiente y la viscosidad del agua de inyección ( $G_w = G_M$ ) ( $\mu_w = \mu$ ).

Una vez determinado lo anterior, se calcula la tasa de fluido motriz ( $Q_M$ ) con base en la producción deseada y la relación de flujo adimensional  $M$ .

### **PASO C:**

Posteriormente se debe elegir la vía de producción a utilizar en el proceso, pues esta puede ser vía anular o vía tubing; de esta manera se hallan las pérdidas de presión por fricción del fluido motriz y las pérdidas de presión por fricción del fluido de retorno ( $P_{FN}$ ).

Consecutivamente se calcula la presión del fluido motriz en la boquilla, como la suma de la presión de operación más la presión hidrostática del fluido motriz, menos la pérdida de presión por fricción en la tubería. Así como también se calcula la tasa del fluido de retorno ( $Q_N$ ), el gradiente del fluido de retorno como un promedio del gradiente del fluido motriz y el gradiente del fluido producido ( $G_D$ ).

### **PASO D:**

En esta parte del proceso independientemente de si el fluido motriz es crudo o agua se calcula la fracción de agua del fluido de retorno ( $F_{WD}$ ).

Después de determinar el  $F_{WD}$ , se debe calcular la relación gas líquido ( $GLR$ ) en el producto y la viscosidad del fluido de retorno como un promedio de las viscosidades del agua y del crudo ( $\mu_d$ ). Adicionalmente se determina la presión de descarga de la bomba ( $P_D$ ).

### **PASO E:**

Luego de determinar el error, el  $H$  y el  $R$  se procede a calcular un nuevo valor de presión de operación superficial deseada ( $P_T$ ), en donde el valor de  $M$  se compara con el valor de  $M$  (inicial) y se debe determinar su variación, si es menos que el 1%,

se puede decir que ha convergido y se procede al siguiente paso del proceso, de lo contrario este nuevo valor de  $M$  se fija como  $M$  (inicial) y se vuelven a calcular los datos a partir del momento en donde se observa si el fluido motriz es crudo o es agua.

#### **PASO F:**

Una vez la variación ha sido menor del 1%, se calcula la relación de flujo adimensional en el límite de cavitación ( $ML$ ), en donde si la relación de flujo adimensionales menor a  $ML$  no existen problemas de cavitación, lo que permite determinar el área de la boquilla requerida para manejar la tasa de fluido motriz y a partir de esta se calcula el área de la garganta, generalmente los valores de áreas calculadas no se encuentran comercialmente por lo que se seleccionan las áreas disponibles más cercanas para obtener la relación de áreas óptimas.

#### **PASO G:**

Por otra parte si la presión operación superficial deseada ( $M$ ) es mayor a  $ML$ , se tendrán problemas de cavitación, lo cual da como resultado fijar un nuevo  $M$  igual a  $ML$  utilizando el valor de áreas seleccionadas para calcular un nuevo valor de la relación de presiones ( $H$ ), así como también la presión de operación superficial requerida para evitar la cavitación.

#### **PASO H:**

Se repiten los cálculos para evitar la cavitación iniciando desde estimar el factor volumétrico de formación para el crudo y para el agua ( $Bf$ ) del proceso.

#### **PASO I:**

Después de haber desarrollado todo el algoritmo se obtendrán los resultados de  $GLR, R, M, H, HP, EF, ML, Q_D, Q_N, P_N, P_S, P_D, Q_D, A_N, A_T, R_2$ .

## 7 MANUAL DE USUARIO

### 7.1 INSTALACIÓN DEL SOFTWARE

El software “*Jet Pump Design*” fue programado utilizando el paquete de MATLAB en su versión 2007 release 14 con paquete de servicio 2, además se contó con un equipo de las siguientes características:

- 1 Terabyte
- Procesador Core i74700 HQ
- Windows 8

Los archivos de **JET PUMP DESIGN** tienen extensión “.m”. Para la instalación del software debe procederse de la siguiente manera:

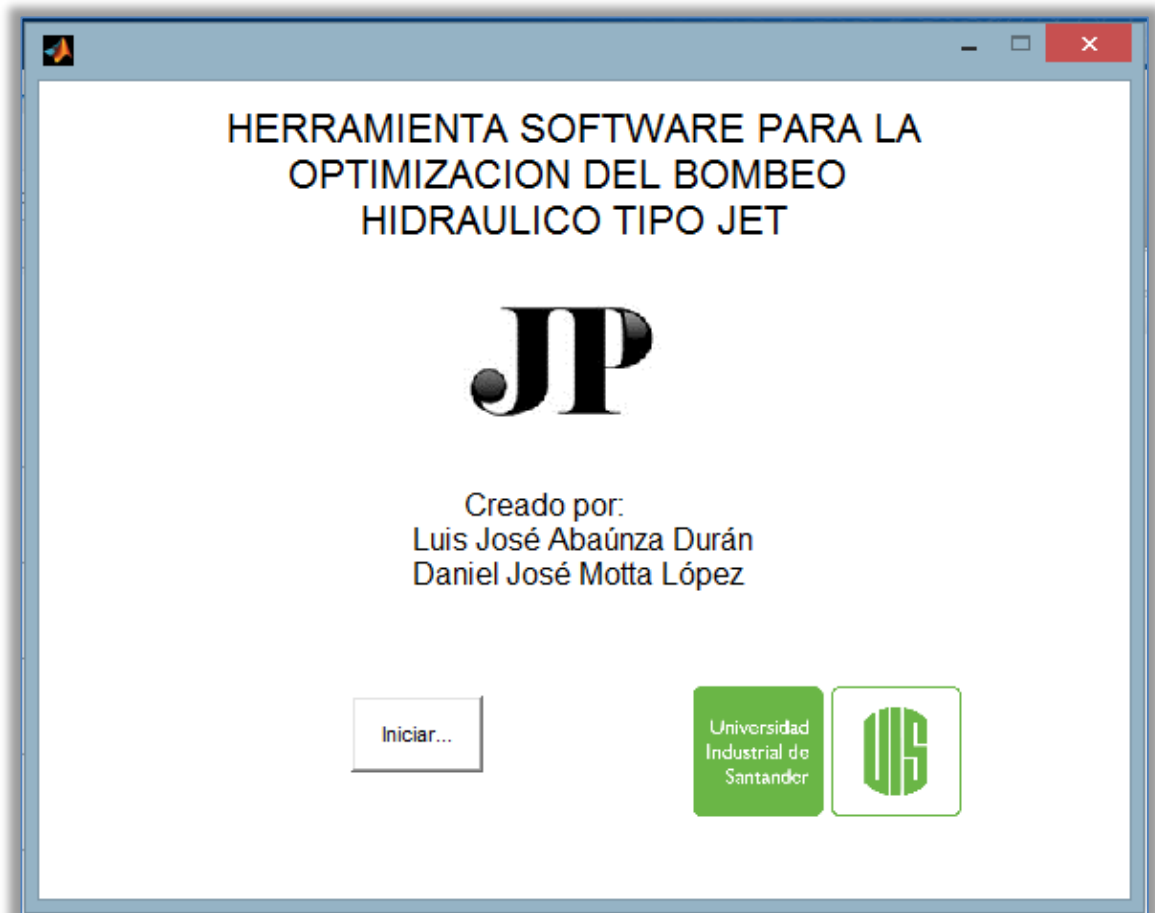
- Crear una subcarpeta llamada **JPDESIGN** dentro de la carpeta de MATLAB.
- Copiar en **JPDESIGN** los archivos con extensión “.m”. Esta es ahora la carpeta de trabajo de MATLAB.
- En la ventana de trabajo de MATLAB y entrando por FILE en la barra de herramientas, escoger la opción Set path.
- Usar el navegador (Browser) que aparece y ubicar **JPDESIGN**.
- En Opciones, escoger Save path, para salvar la ruta de trabajo.
- Ir a la ventana de trabajo de MATLAB.

Para iniciar la ejecución de la herramienta, se oprime el botón **RUN** en la ventana de MATLAB. A continuación se explica de forma general el funcionamiento de JP DESIGN, comenzando por su presentación, mostrada en la figura 18.

**Figura 17.** Logotipo de la herramienta Jet Pump Design



**Figura 18.** Presentación de la herramienta “Jet Pump Design”



## 7.2 DATOS DE ENTRADA

En la pantalla de presentación principal aparecen los datos de entrada, que se subdividen en las siguientes secciones:

- Datos de la Bomba
- Datos de Completamiento
- Datos de Producción

Figura 19. Datos de entrada de la herramienta “Jet Pump Design”

**DATOS DE ENTRADA**

The screenshot displays the 'HERRAMIENTA SOFTWARE PARA LA OPTIMIZACION DEL BOMBEO HIDRAULICO TIPO JET' interface. It is divided into three main input sections: 'Bomba', 'Datos de completamiento', and 'Datos de Producción'. The 'Bomba' section includes fields for 'Profundidad [ft]', 'Longitud del tubing[ft]', 'PIP [psi]', and a dropdown menu set to 'Kobe'. Below these are three diagrams: a cross-section of a jet pump, a wellbore with tubing, and a wellbore with perforations. The 'Datos de completamiento' section has fields for 'Tasa de Prod. [bb/dia]', 'ID Tubing [in]', 'OD Tubing [in]', 'ID CSG [in]', and 'GOR [ft^3/bbl]'. The 'Datos de Producción' section includes 'Presión de Operación[psi]', 'Presión de cabeza [psi]', 'Fluido de Inyección' (with radio buttons for 'Agua', 'Aceite', and 'Anular'), and 'Tipo de Producción' (with radio buttons for 'Tubing' and 'Anular'). Below these are several input fields for 'API', 'Go', 'H2O GE', 'Gw', 'Fw', 'u0', and 'uW', along with a 'M' button. A 'Calcular' button is located at the bottom center of the interface.

### 7.2.1 Datos de la Bomba:

En los datos de la bomba se pide al usuario que digite las siguientes características: profundidad y longitud del tubing en pies (ft), la presión de intake de la bomba en libras/ pul<sup>2</sup>, (psi), por último se pide especificar el tipo de fabricante, se puede escoger entre Kobe, National, Guiberson y Claw.

### 7.2.2 Datos de Completamiento:

En esta sección se pide especificar datos muy comunes de pozo, como lo son: la tasa de producción en barriles por día (bbl/día), el diámetro interno y externo del tubing en pulgadas (in), a su vez el diámetro interno del casing en pulgadas (in), y para finalizar se pide la relación gas-aceite en pies cúbicos por barril (ft<sup>3</sup>/bbl).

### 7.2.3 Datos de Producción:

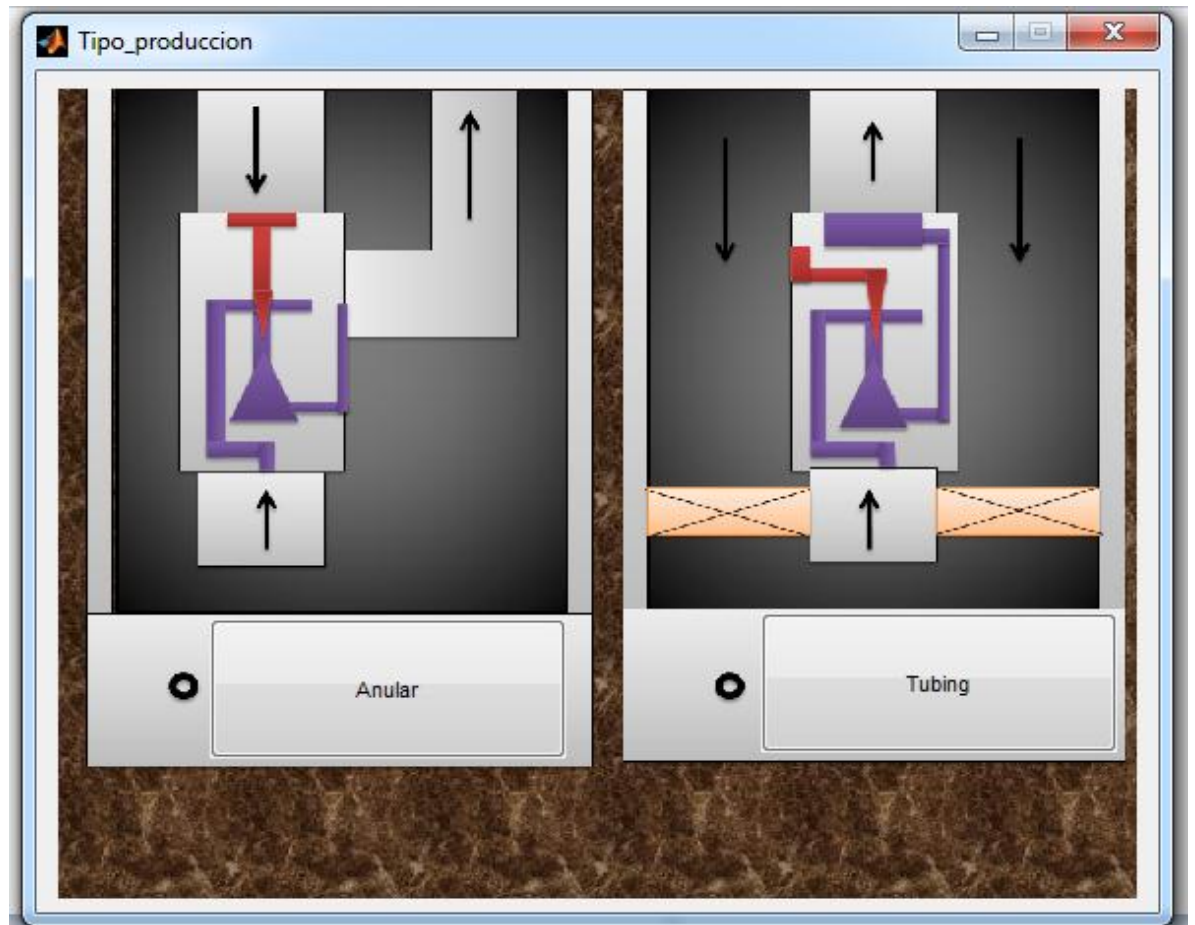
Al comienzo se pide la entrada de datos como lo son la presión de operación en psi, y la presión de cabeza en las mismas unidades.

Luego se pide especificar el tipo de fluido de inyección que se va a utilizar, ya sea agua o aceite. De la misma forma, se puede escoger entre el tipo de producción, por el anular o por el tubing. Todo lo anterior se muestra en la figura 20.

**Figura 20.** Opción para escoger entre el tipo de fluido de inyección y el tipo de producción.

Fluido de Inyección	Tipo de Producción
<input checked="" type="radio"/> Agua	<input type="radio"/> Anular
<input type="radio"/> Aceite	<input checked="" type="radio"/> Tubing

**Figura 21.** Opción para seleccionar el tipo de producción.



Cabe aclarar que al oprimir sobre el tipo de producción se abre la siguiente ventana para seleccionar entre el anular o el tubing, figura 21.

En lo restante de la misma sección se introducen otros datos comunes como lo son la gravedad API, el gradiente del aceite, la gravedad específica del agua, el gradiente del agua, la fracción de agua, además de las viscosidades del aceite y del agua. De la misma forma se puede introducir el valor de  $M$  con el que se va a trabajar, sino se conoce el dato de  $M$  se recomienda comenzar con una valor igual a 1. En la figura 22 se muestra lo anteriormente descrito.

**Figura 22.** Propiedades restantes sección de datos de producción

API		
Go		
H2O GE		M
Gw		
Fw		
u0		
uW		

### 7.3 DATOS DEL IPR:

Al oprimir sobre la opción del *IPR*, nos aparecerá una ventana como veremos a continuación en la Figura 23.

**Figura 23.** Sección Rendimiento de Influjo IPR

### IPR

Pwf [psi] 369

Pr [psi] 1,6\*Pwf

Kobe

Tipo Cañoneo

Underbalanced  Overbalanced

Radio perforación 0.3

SPF = 16

Actualizar gráfica

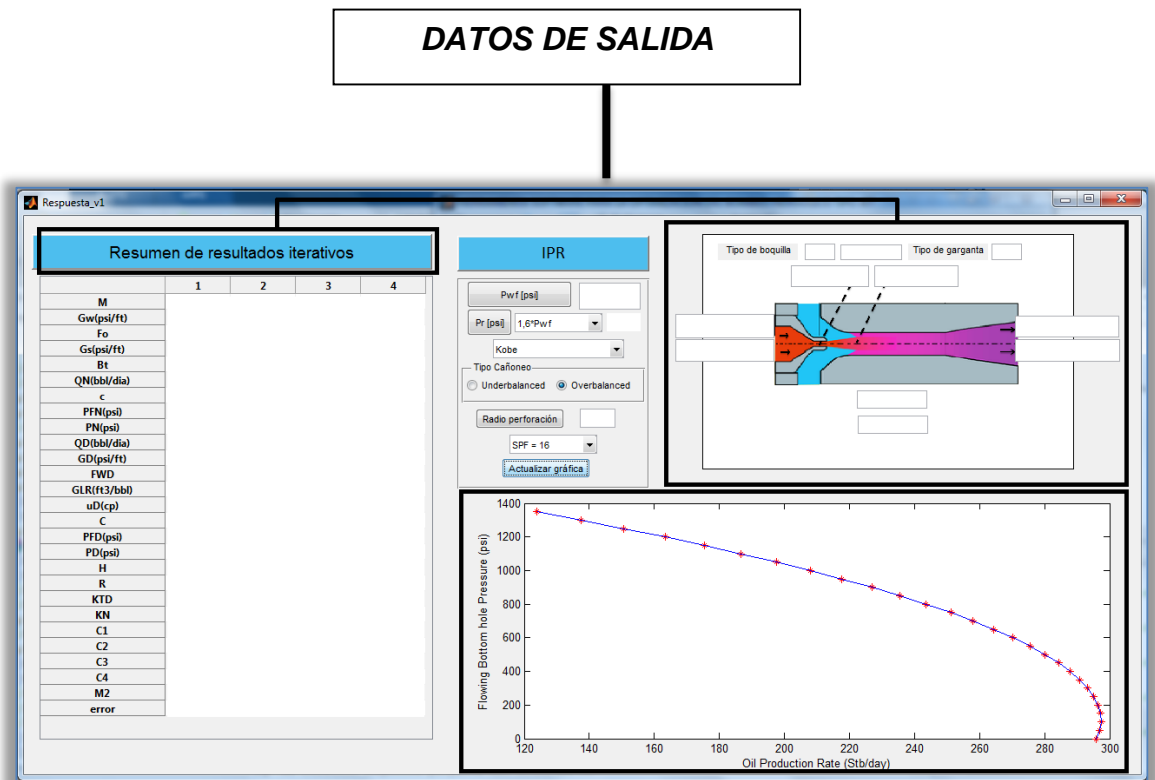
Al comenzar esta sección se le pide al usuario digitar el valor de la  $Pwf$  en libras/pul<sup>2</sup>, (psi). Luego se pide escribir el valor de la presión del reservorio en libras/pul<sup>2</sup> (psi). Si no se conoce esta presión el software permite generar dos valores aproximados, utilizando como referencia el valor de  $Pwf$ . Se puede escoger entre un valor de  $Pr$  que es igual al producto entre  $Pwf$  y 1.6. La otra opción utiliza una presión que se encuentra 500 psi por encima de la última  $Pwf$  conocida.

Otra opción que presenta es permitir la escogencia del tipo de cañoneo que se llevó a cabo, ya fuese underbalanced u overbalanced. El usuario puede introducir el radio de perforación, al igual que los tiros por pie (SPF, o shots per foot), se puede elegir entre 2, 4, 8, 12, ó 16 tiros por pie.

## 7.4 RESULTADOS

En la ventana a continuación se muestra como aparecen los distintos resultados obtenidos en la herramienta software, para luego comenzar a explicar cada parte por separado.

Figura 24. Datos de Salida



#### **7.4.1 Resumen de Resultados Iterativos**

En esta parte se muestra un compendio de los valores para cada una de las propiedades del sistema, incluyendo su variación en cada una de las iteraciones.

Las propiedades que se tienen en cuenta se mencionan a continuación:

- Relación de flujo adimensional
- Gradiente del agua
- Fracción de aceite
- Gradiente del fluido de retorno
- Factor volumétrico de formación total
- Caudal de inyección
- Pérdidas de presión por fricción del fluido motriz
- Presión de inyección
- Caudal de descarga
- Gradiente del fluido de descarga
- Fracción de agua del fluido de retorno
- Relación Gas-Líquido
- Viscosidad del fluido de descarga
- Pérdidas de presión en el circuito de descarga
- Presión de descarga
- Relación de áreas
- Relación adimensional de recuperación de presión
- Pérdidas de presión
- Pérdidas de presión

Se ilustra más claramente en la figura 25.

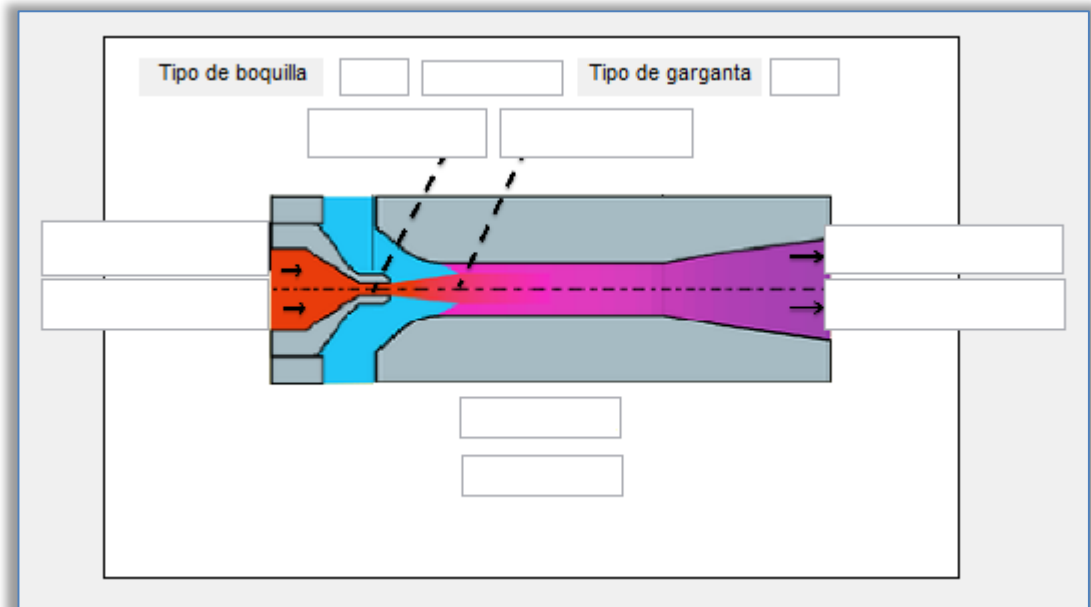
**Figura 25.** Resumen de Resultados iterativos

Resumen de resultados iterativos				
	1	2	3	4
M				
Gw(psi/ft)				
Fo				
Gs(psi/ft)				
Bt				
QN(bbl/dia)				
c				
PFN(psi)				
PN(psi)				
QD(bbl/dia)				
GD(psi/ft)				
FWD				
GLR(ft3/bbl)				
uD(cp)				
C				
PF(psi)				
PD(psi)				
H				
R				
KTD				
KN				
C1				
C2				
C3				
C4				
M2				
error				

#### 7.4.2 Resumen de Resultados de la Bomba

En la figura 25 se puede apreciar cómo, en esta ventana de resultados, se muestran las dimensiones finales de la bomba, tanto el tamaño de boquilla, como el tamaño de garganta, según el tipo de fabricante. A su vez, se exponen los valores para los caudales de descarga y de inyección, igualmente las presiones de inyección y de descarga. Por último también se especifica la potencia y eficiencia para las condiciones de operación que apliquen según el caso.

**Figura 26.** Resumen de resultados de la bomba

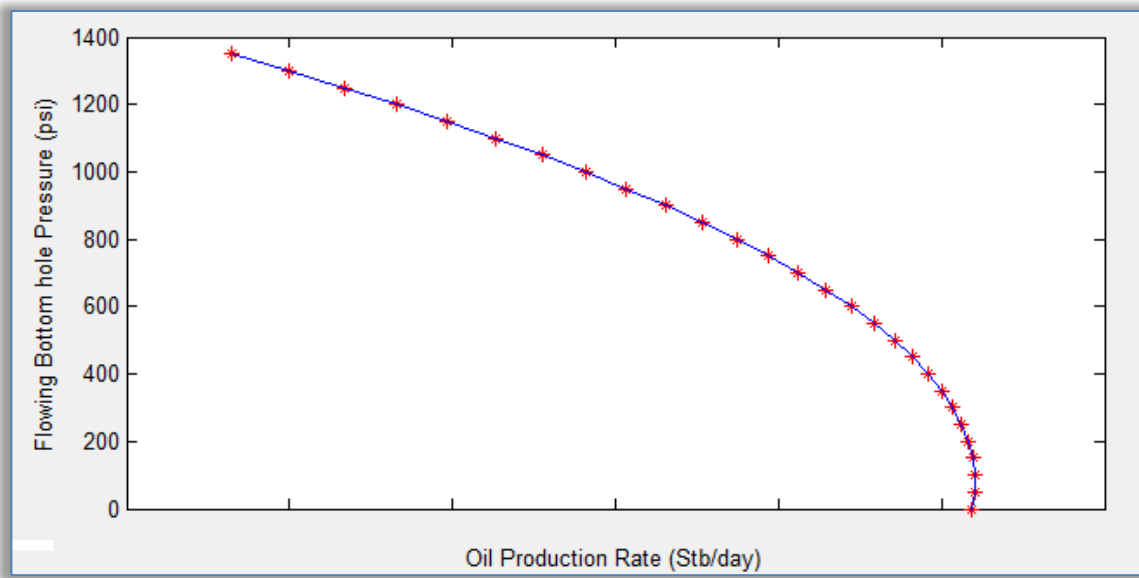


Es pertinente aclarar que tanto las áreas de las boquillas como de las gargantas se especifican en pulgadas cuadradas ( $\text{in}^2$ ), las presiones en libras/pul<sup>2</sup>, (psi), los caudales en barriles por día (bbl/día), la potencia en caballos de fuerza (HP) y la eficiencia en porcentaje.

### 7.4.3 Gráfica de resultados del IPR

En este segmento se muestra la gráfica del *IPR* (figura 27) con unos valores supuestos sobre la misma. Además, se mostrará más adelante como el software para cada caudal de producción muestra el valor más preciso de potencia y eficiencia de cada condición.

**Figura 27.** Resumen de resultados del IPR



## 7.5 EJEMPLO DE APLICACIÓN

Con el fin de ilustrar el procedimiento de cálculo anterior se presentan los siguientes datos de un pozo:

- **Profundidad D = 6920 pies**
- **Longitud de la T.P. L= 7000 pies**

- **Diámetro exterior de la T.P. = 3.5 in**
- **Diámetro interior de la T.P = 2.992 in**
- **Diámetro interior de la tubería de retorno = 8.681 plg**
- **Presión en la cabeza del pozo PWH = 400 lb/ in<sup>2</sup>**
- **Fluido motriz= Agua**
- **Densidad del petróleo= 14 °API**
- **Gradiente del agua GW = 0.4423 lb/ in<sup>2</sup>/pie**
- **Viscosidad del petróleo  $\mu_o$  = 57 cp**
- **Viscosidad del agua  $\mu_w$  = 0.4 cp**
- **Relación gas en solución – petróleo GOR = 71 pie<sup>3</sup>/bbl**
- **Fracción de agua Fw = 0.41**
- **Tasa de producción Q<sub>s</sub> = 194 bbl/día**
- **Presión de fondo fluyente (Pwh) = 1067 lb/ in<sup>2</sup>**
- **Presión de succión PIP = 775 lb/ in<sup>2</sup>**
- **Gradiente del Fluido Motriz G<sub>N</sub>= 0.4396 lb/ in<sup>2</sup>/ft**

### 7.5.1 Solución

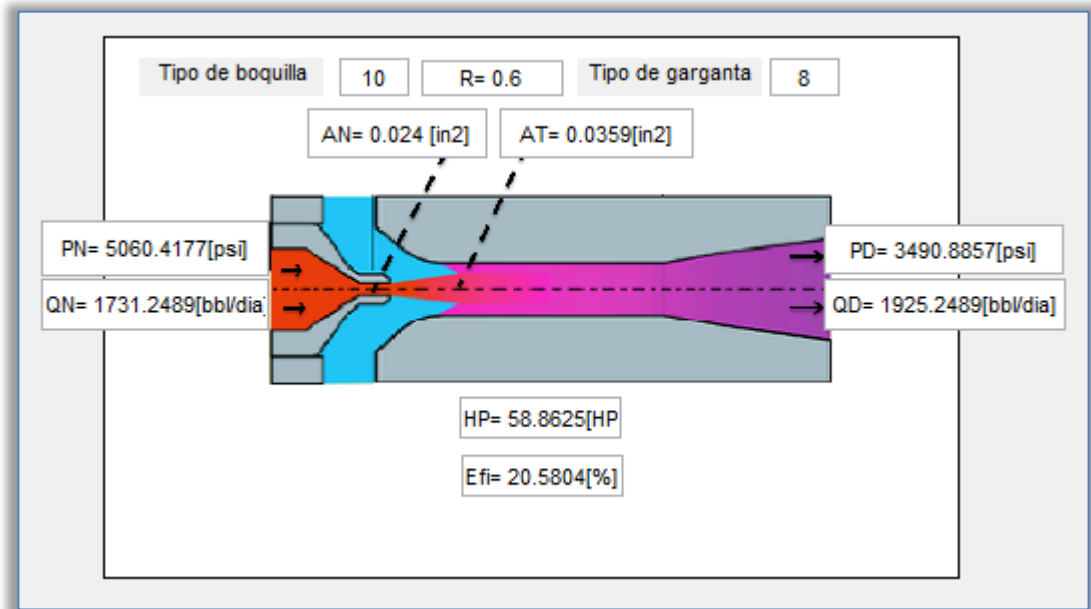
Al correr la herramienta software JP Design, en la ventana de inicio se introducen los datos como lo ilustra la figura 30:

**Figura 28.** Datos de entrada, ejemplo de aplicación

Bomba		Datos de completamiento		Datos de Producción	
Profundidad [ft]	6920	Tasa de Prod. [bb/día]	194	Presión de Operación[psi]	2000
Longitud del tubing[ft]	7000	ID Tubing [in]	2.992	Presión de cabeza [psi]	400
PIP [psi]	775	OD Tubing [in]	3.5	Fluido de Inyección	Tipo de Producción
Kobe		ID CSG [in]	8.681	<input checked="" type="radio"/> Agua	<input type="radio"/> Anular
		GOR [ft <sup>3</sup> /bbl]	71	<input type="radio"/> Aceite	<input checked="" type="radio"/> Tubing
				API	14
				Go	0.421096
				H2O GE	0.3
				Gw	0.4423
				Fw	0.41
				u0	57
				uW	0.4

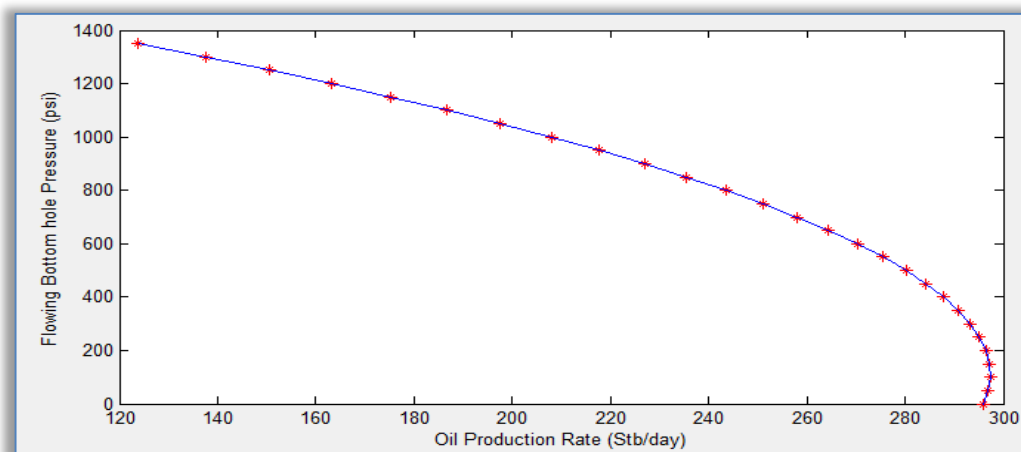
Al oprimir sobre el botón calcular, tenemos que, según el tipo de fabricante Kobe, las dimensiones ideales de la bomba para nuestras condiciones de operación serán de  $A_N= 10$  in y de  $A_T= 8$  in. La relación de áreas será igual a  $R= 0.6$ , como se muestra a continuación.

**Figura 29.** Resultados de la bomba jet



En la ventana de resultados obtenemos la gráfica del *IPR*, la curva toma la siguiente forma:

**Figura 30.** Resultados del IPR



Por último se presenta una tabla con un resumen de los resultados iterativos para cada variable, se presenta en la figura 31:

**Figura 31.** Resumen iterativo para cada variable

Resumen de resultados iterativos				
	1	2	3	4
<b>M</b>	1	0.1342	0.1205	0.1191
<b>Gw(psi/ft)</b>	0.4423	0.4423	0.4423	0.4423
<b>Fo</b>	0.5900	0.5900	0.5900	0.5900
<b>Gs(psi/ft)</b>	0.4298	0.4298	0.4298	0.4298
<b>Bt</b>	1.0938	1.0938	1.0938	1.0938
<b>QN(bbl/dia)</b>	206.2016	1.5363e+03	1.7108e+03	1.7312e+03
<b>c</b>	2.1728e+04	2.1728e+04	2.1728e+04	2.1728e+04
<b>PFN(psi)</b>	0.0066	0.2409	0.2920	0.2983
<b>PN(psi)</b>	5.0607e+03	5.0605e+03	5.0604e+03	5.0604e+03
<b>QD(bbl/dia)</b>	400.2016	1.7303e+03	1.9048e+03	1.9252e+03
<b>GD(psi/ft)</b>	0.4362	0.4409	0.4410	0.4410
<b>FWD</b>	0.7140	0.9338	0.9399	0.9405
<b>GLR(ft3/bbl)</b>	20.3064	4.6968	4.2665	4.2211
<b>uD(cp)</b>	16.5879	4.1442	3.8012	3.7650
<b>C</b>	239.7772	239.7772	239.7772	239.7772
<b>PFD(psi)</b>	3.1638	32.7723	38.2313	38.8931
<b>PD(psi)</b>	3.4219e+03	3.4838e+03	3.4901e+03	3.4909e+03
<b>H</b>	1.6152	1.7180	1.7291	1.7304
<b>R</b>	0.6000	0.6000	0.6000	0.6000
<b>KTD</b>	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000
<b>KN</b>	0.0300	0.0300	0.0300	0.0300
<b>C1</b>	1.2000	1.2000	1.2000	1.2000
<b>C2</b>	-0.4500	-0.4500	-0.4500	-0.4500
<b>C3</b>	0.4320	0.4320	0.4320	0.4320
<b>C4</b>	1.0300	1.0300	1.0300	1.0300
<b>M2</b>	0.1342	0.1205	0.1191	0.1189
<b>error</b>	86.5778	10.1997	1.1832	0.1427

### 7.5.2 Análisis de Resultados

La bomba tipo jet que requiere este pozo para producir una tasa de fluido de 194 bbl/día, con una presión de operación superficial de 2000 lb/in<sup>2</sup>, para Kobe, debe tener un área de boquilla de 0.0215459 in<sup>2</sup>, un área de garganta de 0.0359098 in<sup>2</sup>, e inyectar una tasa de fluido motriz de 1747.46 bbl/día, con una bomba de superficie de 54.41 HP de potencia.

La curva de comportamiento que tendrá el valor más alto de la relación de presiones H, para estas condiciones se corresponde con una relación de áreas R=0.6. Esto significa que el área de la cámara de mezclado necesita ser dos veces más grande que el área de la boquilla.

Las tablas 5 a la 8 indican la alternativa de geometría más adecuada para la producción deseada en el pozo de acuerdo a los cálculos realizados para cada fabricante.

**Tabla 5.** Dimensiones de la bomba Kobe

KOBÉ				
Boquilla		Garganta		R
No.	Área (in <sup>2</sup> )	No.	Área (in <sup>2</sup> )	
9	0,0186	7	0,0278	0,6691
		8	0,0359	0,5181
10	0,024	8	0,0359	0,6685
		9	0,0464	0,5172

**Tabla 6.** Dimensiones de la bomba National

NATIONAL				
Boquilla		Garganta		R
No.	Área (in <sup>2</sup> )	No.	Área (in <sup>2</sup> )	
10	0,0212	8	0,0346	0,6127
		9	0,0441	0,4807
11	0,0271	9	0,0441	0,6145
		10	0,0562	0,4822

**Tabla 7.** Dimensiones de la bomba Guiberson

GUIBERSON				
Boquilla		Garganta		R
No.	Área (in <sup>2</sup> )	No.	Área (in <sup>2</sup> )	
D	0,0177	3	0,0241	0,7344
		4	0,0314	0,5637
E	0,0241	5	0,038	0,6342
		6	0,0452	0,5332

**Tabla 8.** Dimensiones de la bomba Claw

CLAW				
Boquilla		Garganta		R
No.	Área (in <sup>2</sup> )	No.	Área (in <sup>2</sup> )	
10	0,0175	F	0,0239	0,7322
		G	0,0311	0,5627
11	0,0239	H	0,0376	0,6356
		I	0,0447	0,5347

## 8 CONCLUSIONES

- El bombeo hidráulico tipo jet, como método de levantamiento artificial, presenta un amplio rango de condiciones de operación, maneja una gran cantidad de caudales, mayor tolerancia al gas y a la arena. Por lo que debe considerarse como una alternativa óptima a la hora de transportar el fluido a superficie.
- El software permite introducir todas las variables importantes de la bomba como tal, los datos más relevantes de completamiento y de producción para realizar los cálculos respectivos en la selección del sistema con mejor desempeño.
- El diseño parte de la premisa que la condición óptima de operación se presenta cuando se evita el efecto de cavitación. La herramienta desarrollada contiene procesos mediante los cuales dependiendo de la relación adimensional de flujo y presión se estima la relación óptima de áreas boquilla/garganta.
- El paquete desarrollado contiene un módulo con el cual, mediante la selección de la curva adecuada de desempeño de la bomba, se calculan las presiones en el sistema bajo las condiciones particulares suministradas por el usuario. De esta manera se determina las áreas óptimas de boquilla y de garganta del sistema de bombeo hidráulico tipo jet. La respuesta entregada por el software permite escoger el mejor arreglo para los cuatro fabricantes evaluados (Kobe, National, Guiberson o Claw). Esta opción es muy práctica para un diseño preliminar del sistema.

- Utilizando la ecuación de Sukamo con los datos conocidos de yacimiento y de completamiento se puede calcular una  $Q_s$  máxima, permitiendo al software dibujar la gráfica del IPR.
- El software se validó mediante un caso de estudio. Los resultados obtenidos propician una reducción significativa en el grado de incertidumbre en la selección del arreglo óptimo de boquilla y de garganta mediante un análisis más estructurado y robusto evitando el enfoque empírico de la rutina diaria en campo. Usando esta herramienta los ingenieros de producción pueden evaluar las bombas jet dependiendo de sus necesidades de levantamiento de una manera rápida y eficiente.
- La herramienta fue programada en MATLAB y los códigos están disponibles como un anexo en el documento final.
- La herramienta creada muestra características de manejo bastante sencillas, que posibilitan su uso efectivo por parte de cualquier persona.
- En el ejemplo de aplicación, la bomba tipo jet que requiere el pozo para producir una tasa de fluido de 194 bbl/día, con una presión de operación superficial de 2000 lb/in<sup>2</sup>, para Kobe, debe tener un área de boquilla de 0.0215459 in<sup>2</sup>, un área de garganta de 0.0359098 in<sup>2</sup>, e inyectar una tasa de fluido motriz de 1747.46 bbl/día, con una bomba de superficie de 54.41 HP de potencia. El software también se encarga de exponer las configuraciones óptimas para los demás fabricantes, reduciendo incertidumbre en las operaciones, gracias a resultados más precisos.

## 9 RECOMENDACIONES

- Se sugiere introducir la técnica de análisis nodal para que la optimización de la producción se realice con la geometría de la bomba y con todos los componentes del sistema de producción.
- Es importante generar una base de datos de los diferentes diámetros de casing y tubing para agilizar el proceso de entrada de información y de esta forma hacer el programa más completo.
- Este programa es más preciso para valores de  $GOR > 10$  siempre y cuando se introduzcan correlaciones de flujo multifásico.

## BIBLIOGRAFIA

AHMED, Tarek. Hydrocarbon Phase Behavior, Volume 7; Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 1989.

AHMED, Tarek. Reservoir Engineering Handbook, Second Edition; Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 2001.

BAXENDELL, P.B., "The Calculation of Pressure Gradients in High-Rate Flowing Wells", Journal of Petroleum Technology, October 1961.

BEGSS, H. Dale. Production Optimization, Using NODAL™ Analysis. Second Edition; Tulsa, Oklahoma: OGCI and Petroskills, 2003.

BRILL, James P. Multiphase Flow In Wells; Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME Society of Petroleum Engineers Inc, Richardson, Texas 1999.

CAMARGO, Edgar. "Un Modelo De Producción De Pozos Por Levantamiento Artificial Utilizando Análisis Nodal". Revista ciencia e ingeniería. Vol. 30, No. 1, pp. 23-28, 2009.

CHEW J. "A Viscosity Correlation for Gas-Saturated Crude Oils". Trans AIME, 1959.

COBERLY, C.J.. "Theory and Application of Hydraulic Oil Well Pumps", Kobe. Inc. Huntington Park California, 1961.

CUNNIGHAM, R.G.A. "Jet Pump Cavitation", Journal of Basic Engineering. Transactions of the ASME, September 1970.

ECONOMIDES, Michael J. Petroleum Production Systems. Second edition; New Jersey: Prentice Hall PTR, 1994.

FANCHER, G.H., Jr. "A Viscosity Correlation for Gas-Saturated Crude Oils" .Trans AIME, 1959

GOLAN, Michael. Well Performance. Second edition; Trondheim, Norway: Prentice Hall, 1991.

HAGEDORN A.R. "The Effect of Liquid Viscosity in Vertical Two Phase Flow" .Journal of Petroleum Technology, February 1964.

HAGEDORN A.R.: "Experimental Study of Pressure Gradients Occurring during Vertical Two Phase Flow in Smaller-Diameter Conduits". The University of Texas, PhD Dissertation 1964.

JONES, Loyd. "Use of Short Term Multiple Rate Tests to Predict Performance of Wells Having Turbulence" SPE Paper #6133, SPE of Aime, October 1976

LAGE, Antonio C.V.M. "Mechanistic Model for Upward Two-Phase Flow in Annuli".SPE 63127, 2000.

MELO, Vinicio. Optimización de la geometría de la bomba hidráulica jet. Enfoque UTE. 2010.

NIEND, t.e.w. Fundamentos de Producción Y Mantenimiento De Pozos Petroleros; Segunda Edición: Ontario, Canada: Limusa, 1987.

PETRIE, Hal. "The Theory, Hardware and Application of the Current Generation of Oil Well Jet Pumps" Southwestern Petroleum Short Course, 1983.

PETRIE, Hal. "Jet Pumping Oil World Oil", November & December 1983. January 1984.

PEREZ, G. "A New Method to Predict Two Phase Pressure Drop Across Perforations" SPE-PE 93-101, February 1991.

SMART, E., "Jet Pump Geometry Selection", Southwestern Petroleum Short Course, 1985..

SUKAMO, P., "Inflow Performance Relationship Curves in Two- Phase and Three-Phase Flow Conditions" PhD Dissertation, The University of Tulsa, Oklahoma 1986.

TICLLA, Juan." Uso De Análisis Nodal Para Optimización De La Producción Por Bombeo Mecánico En Campos Maduros". V INGEPET(EXPL-3-JT-163), 2005.

VOGEL, J.V., "Inflow Performance Relationship for Solution Gas Drive Wells", Journal of Petroleum Technology, January 1968.

YU Tingting. "A Mechanistic Model for Gas/Liquid Flow in Upward Vertical Annuli" .SPE 124181, 2010.