

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Optimización de producción por medio de tubos Venturi en líneas de superficie con presiones altas.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Petróleo

Presentado por:

Nilson Stalin Zambrano Sánchez

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

“A Dios, mis padres, mi hermana y familiares quienes han permitido hacer esto posible, el eje fundamental en toda mi etapa estudiantil, sobre todo a mis maestros quienes compartieron y mostraron muchas ganas y conocimientos al momento de impartir su catedra durante las horas de clases.”

AGRADECIMIENTOS

“A Dios por guiarme colocando en mi camino personas maravillosas como mis padres, mi hermana y familiares. Mi principal inspiración en tiempos difíciles. A la ESPOL por abrirme sus puertas y permitirme obtener una educación superior de calidad, mis profesores, empresa Sertecpet por el apoyo durante el desarrollo del proyecto, mis amigos que siempre mostraron su respeto y apoyo incondicional.”

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Nilson Stalin Zambrano Sánchez y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Nilson Stalin Zambrano Sánchez', written in a cursive style.

Nilson Zambrano

EVALUADORES

.....
Ing. Fernando Sagnay Msc.

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
Ing. Freddy Carrion Msc.

PROFESOR TUTOR

.....
Ing. Jorge Lliguizaca Msc.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Actualmente la industria petrolera enfrenta desafíos a nivel económico, operacional y medio ambiente. Sobre todo, pozos que presentan condiciones extremas de alta presión representando condiciones complejas para operadores y empresas de servicio. El siguiente trabajo se enfoca en proporcionar un soporte económico y sustentable a corto plazo, su objetivo principal consiste en evaluar la optimización de la producción del pozo, mediante un análisis del sistema de producción que incorpora tubos Venturi en líneas de superficie, para el establecimiento de factibilidad técnica de la propuesta.

El proyecto se caracteriza en reducir las contrapresiones del pozo, su diseño se fundamenta en el principio físico Venturi. Se requiere un fluido motriz primario a alta presión para incrementar la fuerza de un fluido secundario de baja presión y descargar la mezcla de ambos a un nivel de presión determinado.

El sistema ha sido desarrollado en varios países de Europa con éxito debido a su adaptabilidad con cualquier tipo de requerimiento operacional como transferencia de fluidos o desgasificador de líneas de superficie. Este sistema ha sido desarrollado por la empresa ecuatoriana Sertecpet, la cual realizó pruebas de producción al tanque y al manifold a un campo de la amazonía ecuatoriana. Obtuvo 349 [BFPD] sin la implementación del sistema y 371[BFPD] con el uso del sistema Venturi, obteniendo una ganancia de producción de 22 [BFPD] manteniendo una presión de retorno constante.

Palabras Clave: Efecto Venturi, Fluido Motriz, Caudal, Cavitación

ABSTRACT

Currently the oil industry faces economic, operational, and environmental challenges. Above all, wells that present extreme high-pressure conditions, representing complex conditions for operators and service companies. The following work focuses on providing economic and sustainable support in the short term, its main objective is to evaluate the optimization of well production, through an analysis of the production system that incorporates Venturi tubes in surface lines, for the establishment of technical feasibility of the proposal.

The project is characterized by reducing the back pressures of the well, its design is based on the Venturi physical principle. A high pressure primary motive fluid is required to increase the force of a low-pressure secondary fluid and discharge the mixture of both at a given pressure level.

The system has been successfully developed in several European countries due to its adaptability to any type of operational requirement such as fluid transfer or surface line degasser. This system has been developed by the Ecuadorian company Sertecpet, which carried out production tests on the tank and the manifold in a field in the Ecuadorian Amazon. He obtained 349 [BFPD] without the implementation of the system and 371[BFPD] with the use of the Venturi system, obtaining a production gain of 22 [BFPD] maintaining a constant return pressure.

Keywords: *Venturi Effect, Motive Fluid, Flow, Cavitation*

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	5
RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Justificación del problema	2
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo General	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Marco teórico.....	5
1.4.1 Principio físico de diseño	5
1.4.2 Sistemas de inyección del fluido motriz	6
1.4.3 Dispositivo de flujo Venturi.....	10
CAPÍTULO 2.....	12
2. Metodología	12
2.1 Análisis respecto a la problemática	13
2.2 Análisis respecto a la disponibilidad del fluido motriz.....	15
2.3 Análisis respecto a los parámetros requeridos.....	16
2.4 Evaluación del diseño hidráulico	17

CAPÍTULO 3.....	23
3. Resultados Y ANÁLISIS	23
CAPÍTULO 4.....	38
4. Conclusiones Y Recomendaciones	38
4.1 Conclusiones.....	38
4.2 Recomendaciones.....	39
BIBLIOGRAFÍA.....	40

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
NACE	National Association of Corrosion Engineer
HWL	High Water Level
LWL	Low Water Level
FMC	Fluido Motriz Cerrado
FMA	Fluido Motriz Abierto
MTU	Unidad Móvil de Prueba
BSW	Basic Sediment and Water
API	American Petroleum Institute
Vgl	Relación de Flujo Volumétrico Gas/Líquido
Pr	Presión del Reservorio
Pwf	Presión de Fondo Fluyente
Q	Caudal
Pb	Presión de Burbuja
Qsuc.	Caudal de Succión
Qiny.	Caudal de Inyección
Pdesc.	Presión de descarga
Psuc.	Presión de Succión
Piny.	Presión de Inyección

SIMBOLOGÍA

mil	Milésima de pulgada
°F	Grado Fahrenheit
mg	Miligramo
pH	Potencial de Hidrógeno
m	Metro
Cu	Cobre
Ni	Níquel
C	Carbono
Mn	Manganeso
P	Fósforo
Psi	Libra por pulgada cuadrada
Hp	Caballo de fuerza

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 Sistema integral de producción dividido en nodos.....	3
Fig. 1.2 Sección de tubería variable	5
Fig. 1.3 Análisis técnico - Principio de Bernoulli.	6
Fig. 1.4 FMC: FLUIDO MOTRIZ CERRADO	7
Fig. 1.5 FMA: FLUIDO MOTRIZ ABIERTO.....	8
Fig. 1.6 Sistema de tuberías Venturi	10
Fig. 1.7 Esquema transverso (tubo/ Venturi)	11
Fig. 2.1 Representación esquemática del proyecto.....	12
.....	12
Fig. 2.2 Configuración del dispositivo Venturi.....	15
Fig. 2.3 Parámetros requeridos para el diseño de tubos Venturi.....	17
Fig. 2.4 Esquema representativo respecto a la geometría de la bomba.....	19
Fig. 2.5 Explorador de archivos software Syal (Sertecpet).....	20
Fig. 2.6 Entrada de datos respecto al sistema de bombeo hidráulico por el software Syal.	21
Fig. 2.7 Ingreso de datos respecto a la eficiencia de la bomba.	21
Fig. 2.8 Ingreso de datos proporcionada por el software syal.	22
Fig. 3.1 Parámetros requeridos para el desarrollo del proyecto	24
Fig. 3.2 Comportamiento de la bomba Jet.....	27
Fig. 3.3 Grafica correspondiente al gradiente de presión	29
Fig. 3.4 Gráfica: presión a la profundidad de la bomba vs caudal	30
Fig. 3.5 Gráfica: presión a la profundidad de la bomba vs caudal	31
Fig. 3.6 Esquema comparativo analizando ambas pruebas de producción.....	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Elementos de superficie	8
Tabla. 2.1 Ventajas y desventajas del bombeo hidráulico tipo pistón.....	14
Tabla. 2.2 Comparativa respecto al tipo de bombeo hidráulico	14
Tabla. 2.3 Condiciones y características del fluido motriz	16
Tabla. 2.4 Rangos de inyección y producción	18
Tabla. 3.1 Prueba comparativa analizando diversas geometrías de la bomba	25
Tabla 3.2 Informe de prueba en software Syal aplicando una geometría 11J.....	26
Tabla 3.4 Valores correspondientes de la gráfica comportamiento de la bomba jet..	27
Tabla. 3.5 Informe final del análisis nodal para una presión de retorno de 20 psi.....	31
Tabla 3.6 Informe final análisis/nodal	32
Tabla 3.7 Datos proporcionados por software syal respecto a profundidad, presión de inyección y descarga.	33
Tabla 3.8 Influjo a diferentes tasas de caudal y presión a la profundidad de la bomba.	33
Tabla 3.9 Resultado Presión de succión a una presión de inyección de 2800 [Psia].	34
Tabla 3.10 Resultado Presión de succión a una presión de inyección de 2900 [Psia].	35
Tabla 3.11 Resultado Presión de succión a una presión de inyección de 3000 [Psia].	35
Tabla 3.12 Resultado Presión de succión a una presión de inyección de 3100 [Psia].	36
Tabla 3.13 Comparativa entre ambos sistemas de producción	37

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

El efecto Venturi es un principio físico el cual se genera cuando un fluido en movimiento al interior de una tubería incrementa su velocidad al momento de circular por secciones de menor diámetro ocasionando caídas de presión. cuando se alcanzan velocidades muy altas es posible generar presiones negativas, las cuales generan un efecto de succión. (Giovanni Battista Venturi, 1797).

El bombeo hidráulico tipo jet empleado como un levantamiento artificial, utiliza este principio físico para intercambiar la energía cinética producida por el aumento de velocidad del fluido, al momento de salir del estrechamiento de la tubería (menor diámetro del ducto) y posteriormente ingresar al difusor (mayor diámetro de la tubería) en energía potencial la cual será responsable de transportar el crudo del reservorio hacia superficie. La bomba jet claw directa desarrollada por la empresa Sertecpet, se ha desarrollado para la producción continua y pruebas de producción de pozos petroleros en Ecuador. (Byron López Robayo, 2016).

El presente proyecto de investigación consiste en el diseño de un tubo Venturi aplicable a líneas de superficie, su característica consiste en reducir las altas presiones producidas por los pozos, además posibilita una mayor tasa de producción de crudo. Esto debido a su adaptabilidad con el sistema de bombeo hidráulico tipo jet lo constituyen en un dispositivo eficiente. Al mismo tiempo proporcionar un análisis correspondiente al pozo con mayor presión de cabezal, disponible actualmente para el desarrollo de la propuesta.

Para llevar a cabo el estudio, se han estructurado 4 capítulos. En el capítulo I “Marco teórico” se describen elementos correspondientes al sistema de flujo motriz, elementos de superficie del bombeo hidráulico y dispositivo Venturi para lograr un mejor entendimiento del principio físico. En el capítulo II “Metodología” se realiza un análisis correspondiente a la ubicación, propiedades, características del pozo con mayor presión de cabezal. Así como el diseño detallado, características del tubo Venturi que se empleara en líneas de superficie. En el capítulo III “resultados” del

análisis técnico. Capítulo IV “conclusiones y recomendaciones” de la propuesta planteada.

1.1 Descripción del problema

El propósito de aplicar el principio Venturi surge bajo la iniciativa de proporcionar un soporte adicional a métodos de levantamiento artificial, como el de tipo pistón debido a que en pozos irregulares presenta problemas de fricción, al igual que posee un rango de profundidad limitado. Mediante el sistema Venturi se conseguirá disminuir las elevadas presiones de producción producidas por el pozo.

En operaciones de producción existen diversas metas al momento de utilizar un equipo de levantamiento artificial. Por tanto, se requerirán equipos que permitan al pozo obtener elevadas tasas de producción y productividad, minimizando costos de inversión en base a restricciones concretas.

La selección de instalaciones requiere establecer costos respecto a operación del equipo y costos de operatividad inicial, mismos que cambiarán acorde al tipo de yacimiento y sistema de levantamiento que se haiga implementado.

Los costos de levantamiento artificial dependen en gran manera de las condiciones del pozo como su ubicación, presión del yacimiento, temperatura y disponibilidad del suministro eléctrico.

1.2 Justificación del problema

Para obtener una solución conveniente a todas estas operaciones, requeriremos equipamientos de superficie como estación de control, bombas de superficie, separadores, tuberías de alta presión, equipos que serán descritos más adelante para la distribución del fluido motriz hacia el sistema de tubos Venturi. La aplicación y búsqueda de nuevas fuentes de energía han provocado un impacto al medio ambiente (Fauraux,2018).

El caudal de flujo el cual transita mediante todo el elemento de la tubería dependerá de cuanta capacidad tenga la energía en forma de presión. Por tanto, la eficiencia de producción del sistema responderá al balance entre la capacidad de aporte de energía del yacimiento denominado IPR. (Christian Lucas, 2018, pág. 48)

El índice de productividad se define como la relación entre la tasa de producción (q) y el diferencial de presión (ΔP). Se lo representa por J . (Naranjo Agudelo, Abel de Jesús, 1984).

Se define mediante la siguiente expresión:

$$J = \frac{q}{P_{ws} - P_{wf}} \quad (1.1)$$

En donde:

J = índice de productividad, BPD/d/psi

Q = caudal de superficie a condiciones estándar BPPD

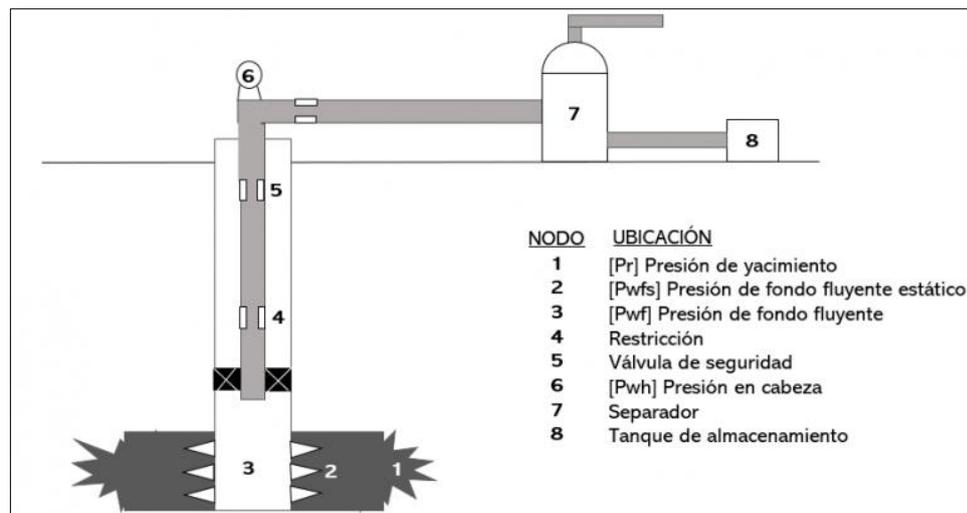
P_{ws} = presión estática del pozo (presión del límite externo del radio del pozo), Psi.

P_{wf} = presión de fondo fluente, Psi.

Por tanto, la expresión de caudal viene dada como:

$$q = J(\overline{P_{ws}} - P_{wf}) \quad (1.2)$$

Fig. 1.1 Sistema integral de producción dividido en nodos



Fuente: [Marcelo Hirschfeldt, 2009]

La aplicación del efecto Venturi en líneas de superficie permitirá aprovechar una mayor tasa de producción, el caudal producido a elevadas presiones mediante las bombas permitirá desplazarse al fluido proveniente del separador, hacia las líneas de superficie con una mayor potencia, mediante la implementación de principios físicos como el de continuidad y Bernoulli se consigue el efecto Venturi. Como consecuencia del estrechamiento interno (reducción de sus diámetros) de las tuberías para aumentar la velocidad del fluido y obtener un efecto de succión a causa de una caída de presión. (Sertecpet, 2018).

El alcance de una buena marcha en cualquier instalación de bombeo hidráulico requerirá que el fluido utilizado se encuentre libre de elementos corrosivos, para la obtención de un fluido motriz apropiado.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar la optimización de la producción del pozo, mediante un análisis del sistema de producción que incorpora tubos Venturi en líneas de superficie, para el establecimiento de factibilidad técnica de la propuesta.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar el análisis correspondiente al pozo con mayor presión de cabezal, para el desarrollo de la propuesta.
- Comparar el rendimiento de aplicación de dispositivos de tuberías en líneas de superficie como el levantamiento artificial de bombeo hidráulico tipo pistón, mediante la evaluación de potencial de producción, para la obtención de adaptabilidad y optimización del diseño de los equipos.
- Obtener un análisis nodal del sistema de producción propuesto, así como pérdidas de presión de flujo del pozo, mediante el uso del software SYAL, para la optimización de producción.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Principio físico de diseño

1.4.1.1 Caudal

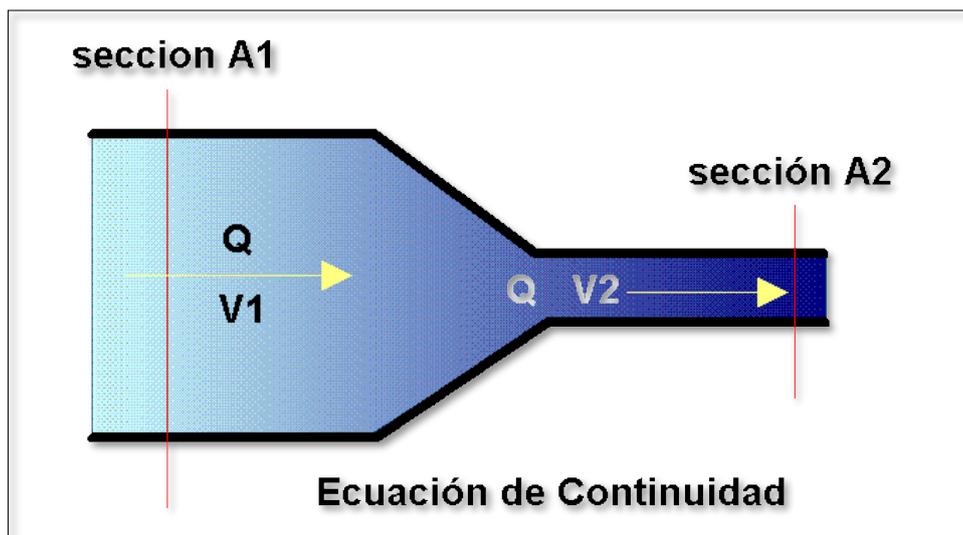
Cantidad de fluido que transita a través de una sección de tubería por unidad de tiempo, también se la conoce como flujo volumétrico o flujo másico. (López Jiménez, Petra Amparo, 2014).

1.4.1.2 Ecuación de Continuidad

Cuando un fluido fluye por un ducto de diámetro variable, es decir su velocidad varía como consecuencia de que la sección transversal cambia de una sección del ducto a otra. (López Jiménez, PA. (2014))

$$A_1V_1 = A_2V_2 \quad (1.3)$$

Fig. 1.2 Sección de tubería variable

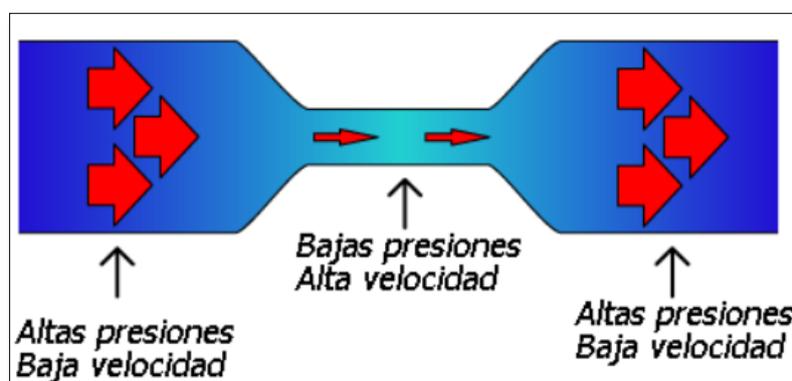


Fuente: [dca.ulpgc]

1.4.1.3 Ecuación de Bernoulli

Este principio establece que donde la velocidad de un fluido es grande, la presión es baja y donde la velocidad es baja, la presión es alta. (Mecánica de fluidos, 6ta Edición)

Fig. 1.3 Análisis técnico - Principio de Bernoulli.



Fuente: [Alberto Rodríguez,2014]

1.4.2 Sistemas de inyección del fluido motriz

1.4.2.1 Sistema de fluido motriz cerrado

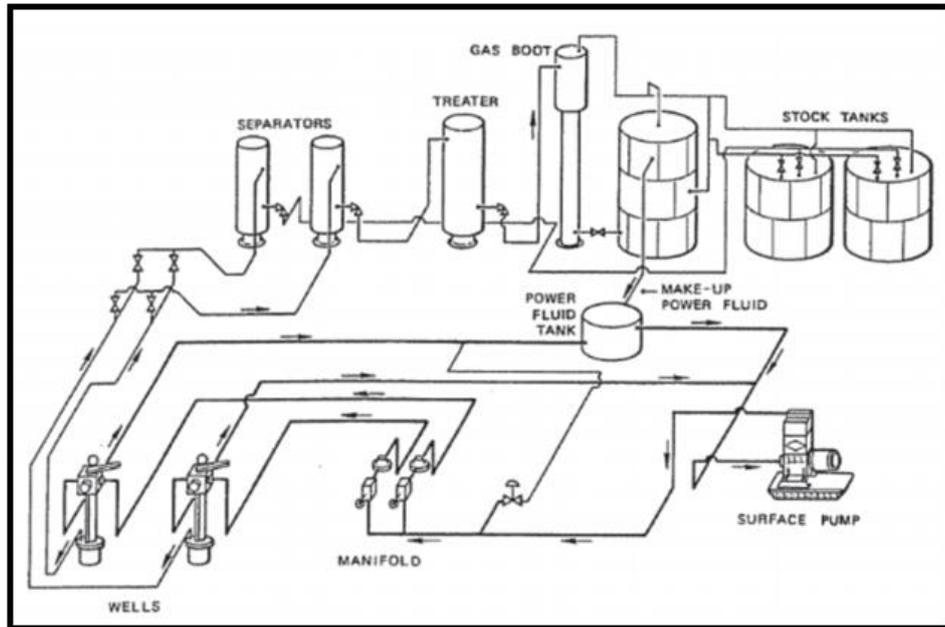
El **fluido motriz** se emplea en el sistema de bombeo hidráulico, dependiendo de las características lubricantes o de compresibilidad que requieran los equipos de superficie, restricciones ecológicas, políticas o según su ubicación geográfica puede ser petróleo o agua. (Pugh Toby, Hydraulic Jet Pumping, 2008, p.261)

El fluido motriz cerrado inyectado regresa a superficie sin mezclarse con el petróleo, el cual fluye hasta el tanque de almacenamiento y posteriormente regresa al subsuelo. Este fluido asciende a través de una tubería adicional llamada cámara de fluido, mientras que el fluido de producción asciende por el espacio anular.

Una de sus principales características radica en su tanque de fluido pequeño ya que proporciona una mayor adaptabilidad en espacios reducidos como urbanizaciones o plataformas offshore.

Debido a que su principal fluido es agua su nivel de peligrosidad y daño ecológico es mínimo, cabe mencionar la importancia en el mantenimiento respecto a su lubricación, inhibición contra corrosiones y eliminación de oxígeno. (Brown, 1980, p. 360).

Fig. 1.4 FMC: FLUIDO MOTRIZ CERRADO

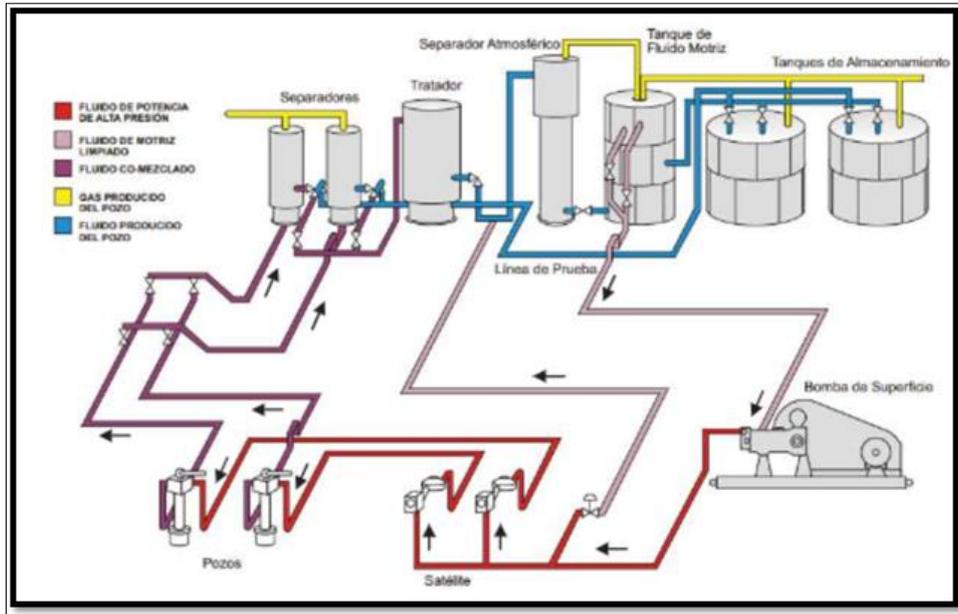


FUENTE: Tomado de Brown, The technology of artificial lift methods, 1980, p. 361.

1.4.2.2 Sistema de fluido motriz abierto

Debido a su economía y sencillas operacional consta como uno de los pioneros en su implementación. Se caracteriza por regresar el fluido mezclado con petróleo a superficie mediante la tubería de descarga o el espacio anular correspondiente a tuberías de producción. Como consecuencia de su implementación obtenemos un fluido motriz limpio sobre todo para pozos con alta salinidad de agua, logrando con esto disminuir los efectos de la corrosión. (Pugh Toby, Hydraulic Jet Pumping, 2008, p.251)

Fig. 1.5 FMA: FLUIDO MOTRIZ ABIERTO



FUENTE: Tomado de Weatherford, s.f

1.4.2.3 Elementos de superficie del sistema de bombeo hidráulico

La siguiente tabla 1.1 muestra los elementos de superficie del bombeo hidráulico los cuales son los que facilitan y dan fuerza al fluido motriz primario a alta presión.

Tabla 1.1 Elementos de superficie

UNIDAD HIDRÁULICA DE PODER	Se compone por una bomba triplex y diversos accesorios. (Sertecpet, 2015)
BOMBAS BOOSTER	Facilitan la energía requerida para succionar y transportar el fluido motriz desde el tanque de almacenamiento de fluido motriz hacia la entrada de la bomba de alta potencia. Potencia de salida del fluido [5 -30 psi]. (Brown, K. E. (s.f.). <i>The technology of artificial lift methods</i> (Vol. 2B). Tulsa: PennWell Books.)
BOMBAS DE ALTA POTENCIA	Es la encargada de suministrar fluido presurizado hasta la bomba hidráulica en el subsuelo. Su rango de operatividad comprende [5-30 psi] entrada y [3600-4000 psi] salida. (Brown, K. E. (s.f.). <i>The</i>

	<i>technology of artificial lift methods</i> (Vol. 2B). Tulsa: PennWell Books.)
CENTRAL DE CONTROL DE PODER	Su función consiste en distribuir el petróleo motriz a cada pozo conforme lo requieran. (Brown, K. E. (s.f.). <i>The technology of artificial lift methods</i> (Vol. 2B). Tulsa: PennWell Books.)
LINEAS DE CONDUCCIÓN DE PETROLEO MOTRIZ	Conducen el petróleo motriz desde la planta central a cada pozo proporcionan una resistencia de hasta 5000 psi. (Brown, K. E. (s.f.). <i>The technology of artificial lift methods</i> (Vol. 2B). Tulsa: PennWell Books.)
TUBERÍAS DE ALTA PRESIÓN	Resisten hasta los 5000 psi, su objetivo radica en transportar el fluido de inyección desde la planta hasta el cabezal. (Brown, K. E. (s.f.). <i>The technology of artificial lift methods</i> (Vol. 2B). Tulsa: PennWell Books.)
TUBERÍAS DE BAJA PRESIÓN	Proporcionan una resistencia de 500 a 800 psi, por lo general se sitúan desde la salida de producción del pozo hasta el tanque de almacenamiento. (Brown, K. E. (s.f.). <i>The technology of artificial lift methods</i> (Vol. 2B). Tulsa: PennWell Books.)
TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE FLUIDO MOTRIZ	Lugar donde se almacena el fluido motriz que se suministrara al pozo, debe ser capaz de proporcionar una buena caída de presión a fin de facilitar una óptima succión de la bomba de fluido motriz. (Cortés Pamela, 2020)
CABEZAL DE POZO	Conjunto de válvulas reguladoras de presión que permiten el paso del fluido de inyección hacia la tubería de producción. Su capacidad oscila entre los 3000 a 5000 psi. (Brown, K. E. (s.f.). <i>The technology of artificial lift methods</i> (Vol. 2B). Tulsa: PennWell Books.)

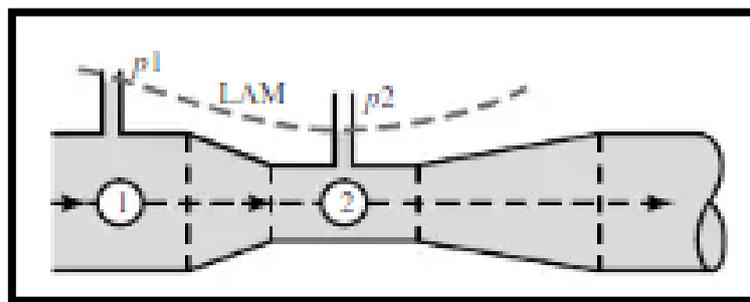
Nota. Correspondiente al sistema de bombeo hidráulico

1.4.3 Dispositivo de flujo Venturi

El dispositivo consiste en un conjunto de tuberías con secciones diferentes las cuales permiten, aumentar la velocidad del fluido (por el principio de continuidad, su energía cinética aumenta) al momento de transitar por una sección menor. (Giancoli,2009).

Este cambio de velocidades ocasiona una caída de presión. Esta caída de presión ocasiona un efecto de succión el cual utilizaremos para ayudar a cualquier tipo de levantamiento implementado desde las líneas de superficie.

Fig. 1.6 Sistema de tuberías Venturi

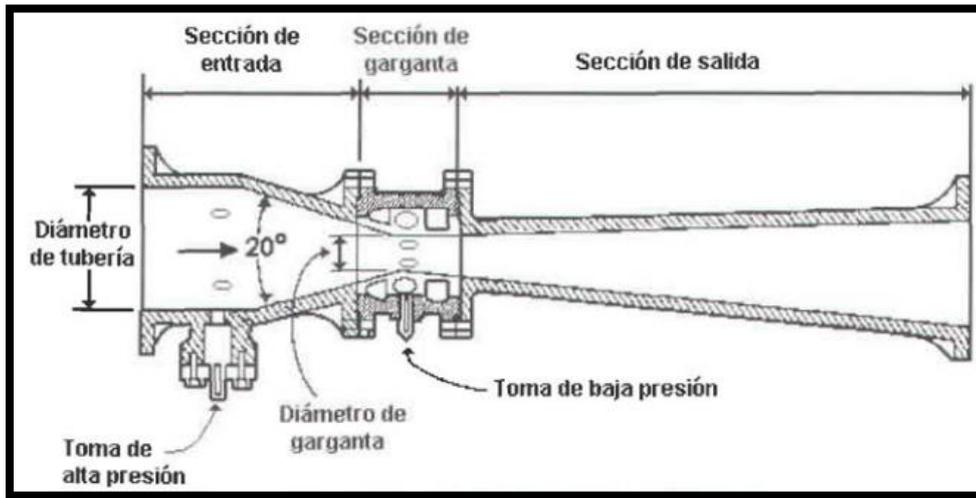


Fuente: [Tomada de Cengel 5ta. Edición]

La siguiente figura 1.7 representa una sección transversal interna del tubo Venturi el cual se divide en tres etapas:

- Sección de entrada
- Sección de garganta
- Sección de salida

Fig. 1.7 Esquema transverso (tubo/ Venturi)



Fuente: [Rivas, 2001]
repositorio.imta.mx

La sección de entrada es la que recibe el fluido de agua de alta presión proveniente del separador a las bombas, como se puede apreciar existe una reducción misma que proporcionara mayor velocidad de salida al fluido.

La sección de garganta es la encargada de estrangular al fluido. En este punto debido a que el fluido experimenta un elevado incremento en su velocidad, la presión disminuye drásticamente por consiguiente se crea el efecto de succión (Venturi), como se puede apreciar las burbujas indican el ingreso de fluido proveniente del reservorio.

La siguiente sección corresponde al difusor en el cual la tubería va incrementando de a poco su diámetro, por tanto, al final el fluido disminuye su velocidad y aumenta su presión. Este fluido ira mezclado con agua y petróleo del reservorio al separador.

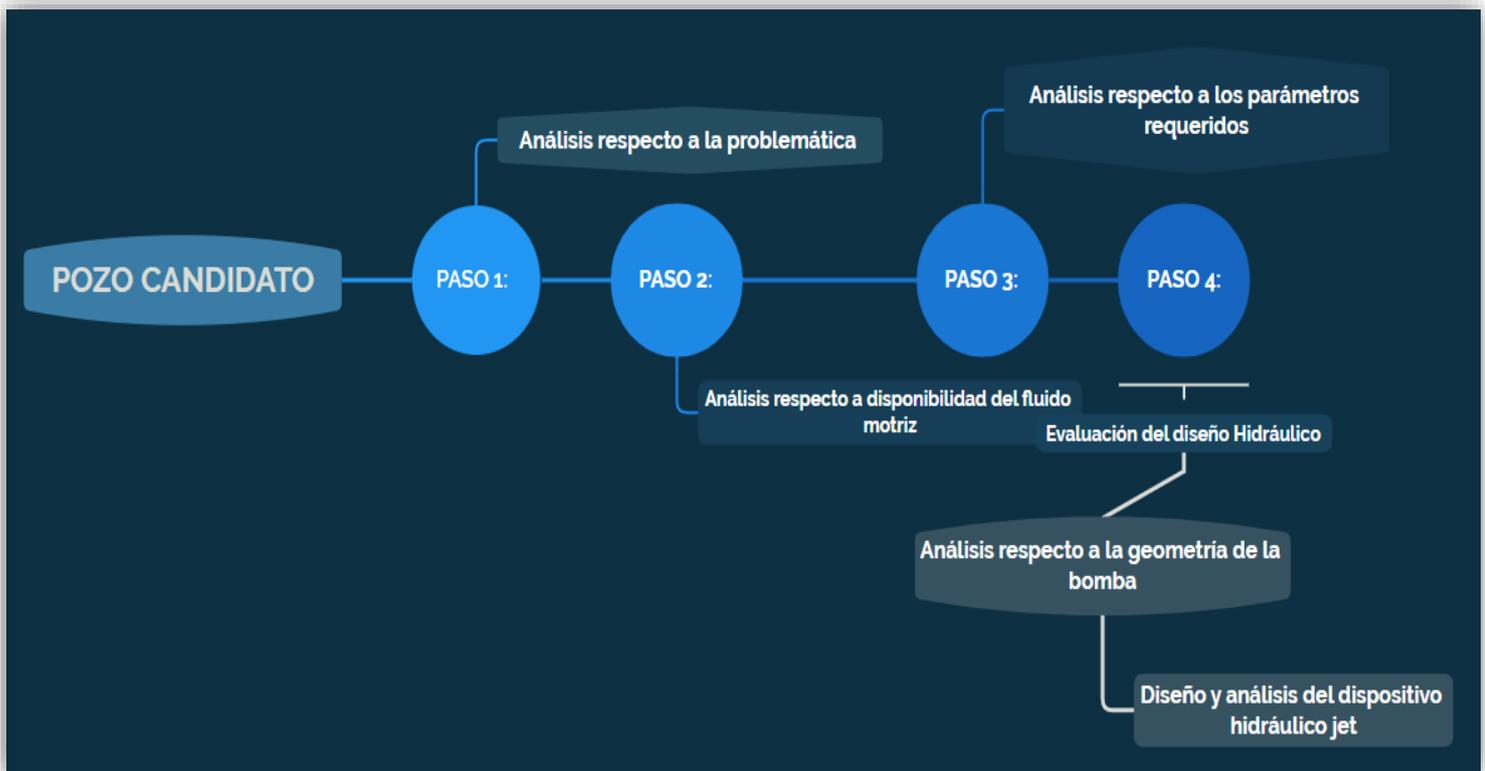
CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

La metodología se representa en cuatro pasos, como se muestra en la fig. 2.1 El paso 1 se empezó analizando la problemática la cual consiste en reducir la contrapresión producida por el cabezal del pozo, paso 2 un análisis respecto a la disponibilidad del fluido motriz el cual se requiere para el sistema de bombeo hidráulico.

Paso 3 un análisis respecto a los parámetros requeridos del pozo de estudio, finalmente el paso 4 donde se presenta la evaluación del diseño hidráulico respecto a la geometría de la bomba la cual es la encargada de optimizar y mantener un óptimo desempeño operacional de flujo hacia las líneas de superficie.

Fig. 2.1 Representación esquemática del proyecto



Fuente: [Nilson Zambrano, 2022]

Para el desarrollo del presente trabajo la selección del pozo candidato requiere cumplir con información técnica para empezar con el dimensionamiento del dispositivo Venturi. Toda la información disponible y aprobada para su estudio permitirá optimizar la producción de crudo de forma más económica y eficiente

2.1 Análisis respecto a la problemática

La problemática surge a partir de las altas contrapresiones producidas por los pozos, esto repercute en las líneas de superficie ya que en muchos casos afecta la tasa de producción de crudo. El trabajo consiste en la implementación de un principio físico denominado efecto Venturi el cual requiere de un fluido motriz de alta presión para incrementar la fuerza de un fluido motriz de succión y desplazarlo a superficie.

Es decir, el sistema se caracteriza por reducir la presión de flujo del pozo y así incrementar su producción. El bombeo hidráulico tipo jet requiere de la MTU (unidad móvil de prueba) la cual se utiliza para la evaluación y producción de pozos petroleros por medio del levantamiento artificial hidráulico.

Es la encargada de proporcionar el fluido motriz de inyección necesario para el adecuado funcionamiento de la bomba. Es clave para el desarrollo de la propuesta de tubos Venturi, un sistema de bombeo hidráulico tipo jet posee ventajas en pozos con:

- Tasas de producción bajas a medianas
- Baja productividad
- Bajas relaciones de gas en solución
- Bajas presiones de producción en el fondo del pozo

Bombeo hidráulico tipo pistón

El pistón motor y el pistón de bombeo están conectados por un vástago intermedio. El diseño del vástago de la válvula es tal, lo cual permite al petróleo motriz actuar sobre la válvula de distribución cuando el pistón motor está cerca del final de su carrera. El vástago inferior, lo mismo que los otros vástagos, hueco; de tal manera equilibra la presión del petróleo motriz en ambos extremos del conjunto vástago y pistones.

Los pistones están también perforados, por esta razón las paredes de los cilindros del motor y de la bomba se lubrican con petróleo motriz, radicando la importancia de tener un petróleo motriz completamente limpio. En la siguiente tabla. 2.1 se representan sus principales ventajas y desventajas de su implementación.

Tabla. 2.1 Ventajas y desventajas del bombeo hidráulico tipo pistón

Ventajas	Desventajas
Trabajan con baja presión de entrada	Poseen partes móviles por tanto se vuelven más frágiles en el manejo de sólidos abrasivos.
Menor consumo de energía en superficie	Debido a la complejidad de sus partes, su mantenimiento es costoso.
	Requieren un fluido motriz limpio.
	Rango de profundidad limitado.

Se caracteriza por transmitir presión desde un equipo de bombeo hidráulico en superficie mediante una tubería llena de líquido hacia cualquier número de pozos. En este tipo de bombeo, el fluido motriz se combina con el fluido motriz de producción por tal motivo el circuito motriz empleado para la producción es cerrado a condiciones de superficie.

Su principio de diseño radica en la “Ley de Pascal” y como principales ventajas tenemos:

- Bajos costos de mantenimiento
- No requiere equipos de reacondicionamiento de pozos
- Puede utilizar el sistema de reinyección o inyección como fuente de fluido motriz.
- Factibilidad para medir fluidos en superficie.

La **tabla. 2.2** presente a continuación muestra algunas comparaciones respecto al tipo de bombeo hidráulico tipo pistón vs el bombeo hidráulico tipo jet, frente a diversas condiciones del pozo.

Tabla. 2.2 Comparativa respecto al tipo de bombeo hidráulico

	Hidráulico	Jet
Arena	Adecuado	Bueno
Parafina	Bueno	Bueno
Alto GOR	Adecuado	Bueno
Hoyo desviado	Bueno	Bueno
Corrosión	Bueno	Bueno
Alto volumen	Bueno	Excelente
Profundidad	Excelente	Excelente
Escala	Adecuado	Bueno
Flexibilidad volumétrica	Excelente	Bueno

Tomada de la American Oil and Gas Reporter Magazine

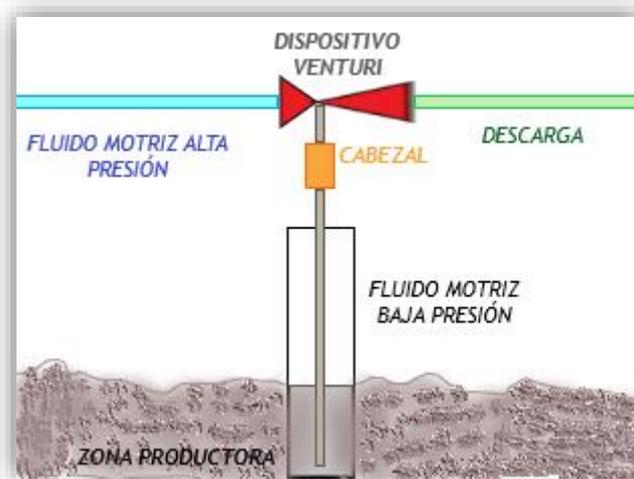
2.2 Análisis respecto a la disponibilidad del fluido motriz

La calidad del fluido motriz es de gran importancia ya que garantizará la vida útil de la bomba, sobre todo en los costos de reparación. El fluido motriz dependerá del tipo de aplicación que le demos al dispositivo Venturi, por lo tanto, esta podría ser agua o gas de acuerdo con los requerimientos de las problemáticas como por ejemplo pozos con altas presiones o para desgasificar una línea de producción.

La fig. 2.2 muestra un fluido de alta presión el cual atraviesa la boquilla del dispositivo donde parte de la presión se convierte en energía cinética aumentando su velocidad. Por consiguiente, la presión del fluido de alta presión cae frente a la boquilla. En este punto se produce el efecto de succión introduciéndose el fluido de baja presión.

La mezcla es conducida hacia el tubo mezclador donde se da una transferencia de energía y momento entre ambos fluidos de alta y baja presión. Finalmente, esta mezcla pasa a través del difusor donde la velocidad de los fluidos se reduce gradualmente y tiene lugar una mayor recuperación de la presión.

Fig. 2.2 Configuración del dispositivo Venturi



Fuente: (Nilson Zambrano, 2022)

El fluido motriz se mezcla necesariamente con el fluido de producción, debido a esto el circuito de fluido motriz empleado para producción es cerrado, a condiciones de superficie. La tabla 2.3 descrita a continuación muestra las condiciones y características del fluido motriz, primario a alta presión y secundario a baja presión.

La tabla 2.3 muestra las características respecto al fluido motriz primario y fluido motriz secundario. El fluido motriz primario requiere de una presión de inyección a alta potencia ya que deberá incrementar la fuerza de un fluido motriz secundario de succión para desplazarlo a superficie.

Tabla. 2.3 Condiciones y características del fluido motriz

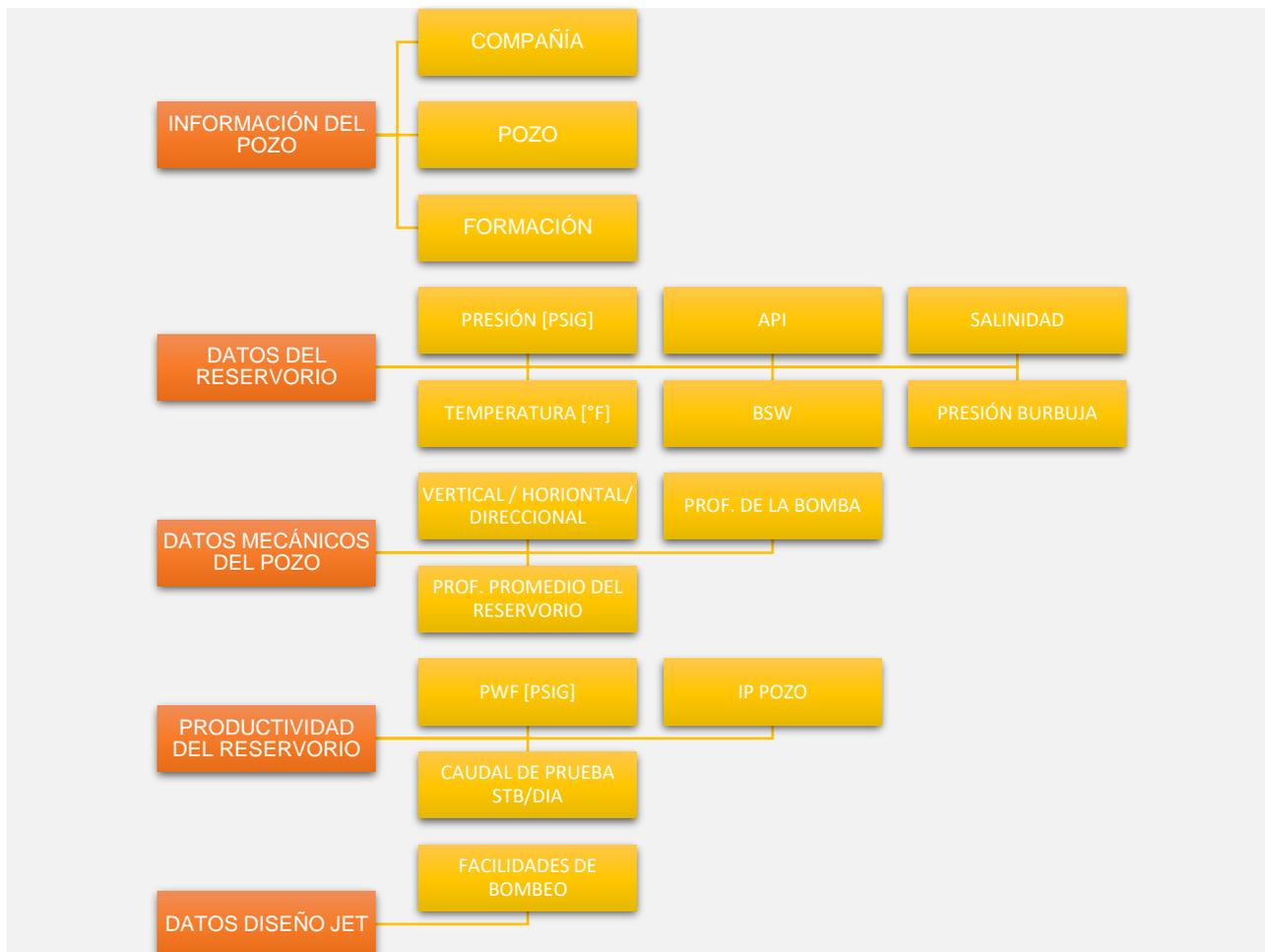
FLUIDO MOTRIZ	
PRIMARIO	SECUNDARIO
Alta potencia	BSW
Presión de inyección	API
Caudal de inyección	Salinidad
Temperatura de inyección	Presión de entrada
BSW de inyección	Caudal de succión
API de inyección	
Presión de descarga	

2.3 Análisis respecto a los parámetros requeridos

Como se visualiza en la fig. 2.3 para el desarrollo del proyecto se requieren parámetros claves proporcionados y acreditados por el cliente o empresa que requiera el uso del dispositivo Venturi, información detallada y precisa como los datos del reservorio correspondiente a la presión ya que, representa la disponibilidad de energía del sistema y a su vez sirve de referencia para conocer si el crudo se encuentra en una o dos fases. Por lo anteriormente mencionado también debemos contar con información sobre la presión de saturación o punto de burbuja, es preferible que el sistema opere sobre este valor, porque rangos mayores generarían burbujas de gas las cuales afectarían y reducirían el tiempo de vida útil de la bomba.

Otro parámetro importante para considerar son los datos mecánicos del pozo como la profundidad promedio del reservorio puesto que, posibilitan la determinación del nivel estático y dinámico del fluido.

Fig. 2.3 Parámetros requeridos para el diseño de tubos Venturi



2.4 Evaluación del diseño hidráulico

2.4.1 Análisis respecto a la geometría de la bomba

En el transcurso de los años se han desarrollado softwares prácticos que facilitan y dan soporte a las empresas para la determinación del potencial de producción de los pozos como el índice de productividad.

Una de las empresas encargadas de brindar el asesoramiento técnico respectivo de los pozos ha sido la empresa ecuatoriana Sertecpet S.A, una vez de haber ingresado los parámetros requeridos descritos en la fig. 2.3 mediante la implementación del software Syal, se podrá contar con los resultados de los informes finales en tiempo real respecto al análisis nodal del pozo y la cantidad de petróleo optimizada.

Los componentes claves en el desarrollo del dispositivo Venturi son la nariz (Boquilla) y garganta junto a sus respectivas áreas internas las cuales proporcionan el rendimiento de la bomba. Se deberá seleccionar varias opciones entre las diferentes configuraciones

geométricas, estas facilitan la manipulación de los diversos caudales de inyección y producción, la información relacionada con la inyección máxima y producción aproximada se aprecian en la siguiente tabla. 2.4

Tabla. 2.4 Rangos de inyección y producción

INYECCIÓN MAXIMA APROXIMADA		PRODUCCIÓN APROXIMADA	
NOZZLE	INYECCIÓN	GEOMETRIA	PRODUCCIÓN
4	400 BPD		BPD
5	600 BPD	5E/5F	400
6	750 BPD	6F/6G	600
7	1000 BPD	7G/7H	800
8	1250 BPD	8H/8I	1000
9	1450 BPD	9I/9J	1400
10	1600 BPD	10J/10K	1600
11	2400 BPD	11K/11L	2200
12	3400 BPD	12L/12M	3200
13	4500 BPD	13M/13N	4500
14	6000 BPD	14N/14O	6000

Respecto a la selección de la bomba se requieren datos clave como:

- Tipo de fluido motriz
- Presión del reservorio (Pr)
- Presión de fondo fluyente (Pwf)
- Producción actual del pozo (Q)
- Gravedad específica del fluido motriz
- Profundidad de asentamiento de la bomba
- Profundidad de las perforaciones

El siguiente diagrama representado en la fig. 2.4 muestra los requerimientos necesarios para seleccionar una óptima geometría de la bomba. Por ejemplo, los limitantes del sistema respecto a superficie como la presión y caudal de inyección puesto que, dependiendo de su valor obtendremos una configuración geométrica recomendada.

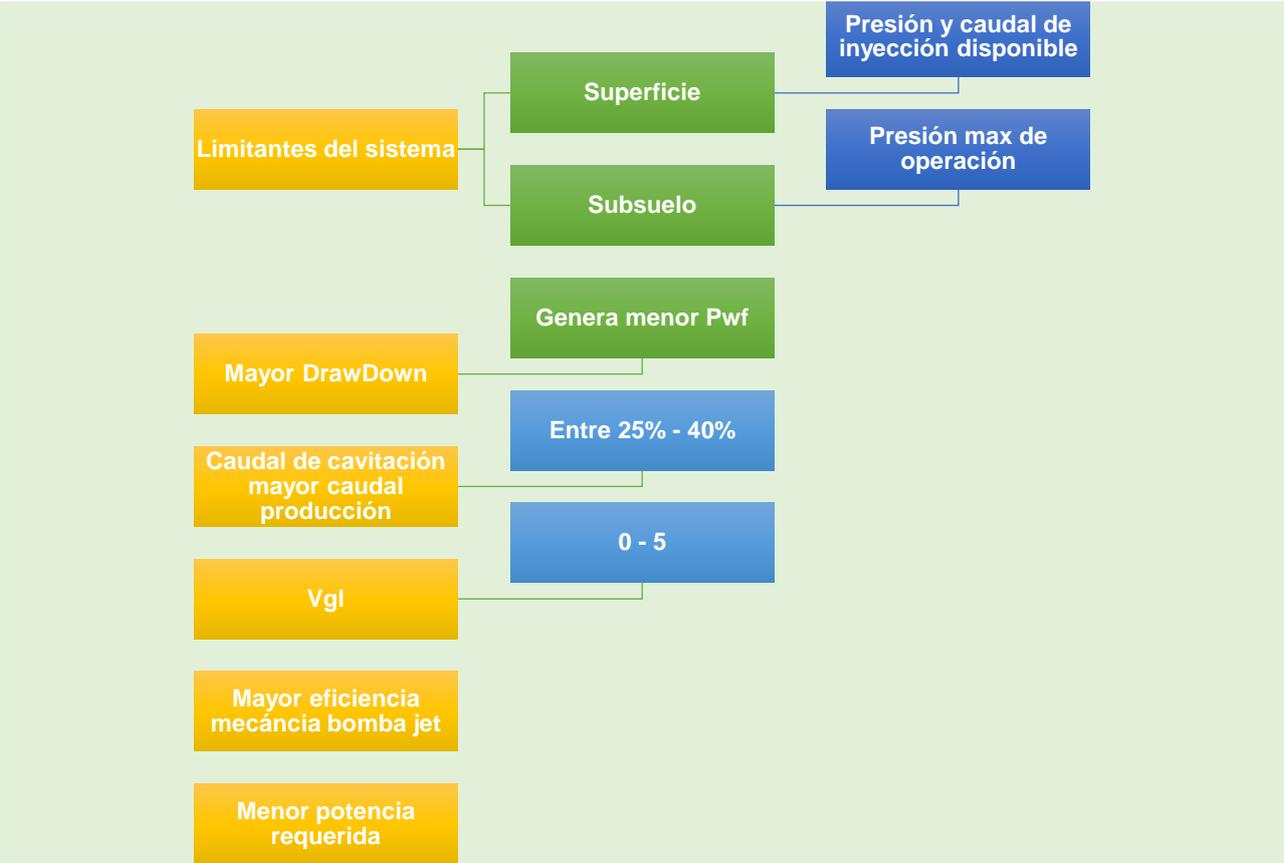
La tabla 2.4 descrita anteriormente, permite sacar una mayor ventaja posible al momento de obtener un caudal de succión y no afecte al funcionamiento de la bomba. El caudal de cavitación es de gran importancia puesto que, suelen darse con bajas presiones de succión ocasionando fallas mecánicas.

El vgl es un factor adimensional y representa la relación de flujo volumétrico gas/líquido del fluido producido, representa las siguientes fases:

- Vgl igual a 0, fase líquida es el medio continuo
- $0.1 < vgl < 1$, son mezclas homogéneas burbujeantes de gas en una fase líquida continua.
- $Vgl > 10$, Gas es el medio continuo, es decir, gotas están suspendidas en el gas.

Por esta razón encontramos un vgl entre 0 y 5 en el esquema representado ya que, es el más seguro para seleccionar la bomba.

Fig. 2.4 Esquema representativo respecto a la geometría de la bomba.



2.4.2 Diseño y análisis del dispositivo hidráulico jet

Modos de cálculo:



La siguiente fig. 2.5 representa la ventana correspondiente al explorador de archivos del software corporativo Syal perteneciente a la compañía ecuatoriana Sertecpet.

Nos permite ordenar de forma detallada y jerárquicamente nuestros proyectos según el campo y ubicación de los pozos como se puede apreciar es la imagen principal al momento de iniciar el programa.

Fig. 2.5 Explorador de archivos software Syal (Sertecpet)



Como se puede apreciar en la fig. 2.6 dependiendo del sistema de bombeo hidráulico, el programa facilita modificar el tipo de fluido. En este caso se emplea un sistema MTU (Unidad móvil de prueba), mismo que proporciona el fluido motriz de inyección necesario para el adecuado funcionamiento de la bomba. A demás de proporcionar el modo de cálculo como, presión de inyección fija, fondo fluyente o el recomendado por el software.

Fig. 2.6 Entrada de datos respecto al sistema de bombeo hidráulico por el software Syal.

The screenshot shows a software interface for entering data for a hydraulic pumping system. It is divided into two main sections: 'Sistema de bombeo hidráulico' and 'Modo de cálculo'. In the 'Sistema de bombeo hidráulico' section, there is a dropdown menu currently set to 'MTU'. Below it, the label 'Presión de fondo fluyente fija' is followed by an empty input field. In the 'Modo de cálculo' section, a dropdown menu is open, showing four options: 'Presión de fondo fluyente fija' (which is highlighted in blue), 'Presión de inyección fija', 'Presión de fondo fluyente fija', and 'Recomendado'. Below the dropdown menu, there are two more input fields: one for 'Presión de fondo fluyente' with a unit dropdown set to 'Psia', and another for 'Temperatura de inyección' with a unit dropdown set to '°F'.

Eficiencia de la bomba de superficie

En esta sección representada en la fig. 2.7 la mayor eficiencia de la bomba se obtiene con la mayor presión operacional ya que, se requiere una menor tasa de fluido motriz y como resultado se tiene menores pérdidas de presión por fricción en la tubería.

Fig. 2.7 Ingreso de datos respecto a la eficiencia de la bomba.

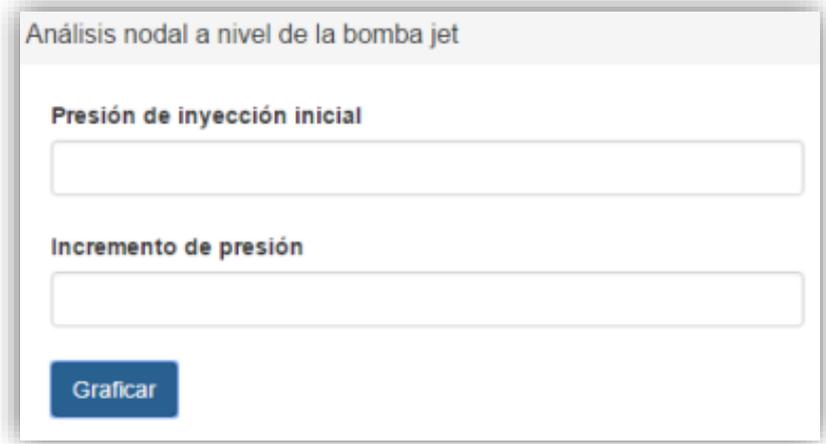
The screenshot shows a software interface for entering data for surface pump efficiency. The title bar reads 'Datos de la bomba de superficie'. Below the title bar, the label 'Eficiencia de la bomba de superficie' is followed by an empty input field. To the right of the input field is a unit dropdown menu currently set to '%'. The entire interface is enclosed in a light gray border.

Configuración del análisis nodal

Para conocer el análisis nodal proporcionado por el sistema Syal, tal como se muestra en la fig. 2.8 se requieren datos correspondientes a la presión de inyección inicial e

incremento de la presión por consiguiente se obtiene los puntos de corte entre la curva inflow y las curvas de la bomba.

Fig. 2.8 Ingreso de datos proporcionada por el software syal.



Análisis nodal a nivel de la bomba jet

Presión de inyección inicial

Incremento de presión

Graficar

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se describe un caso real de éxito mediante la aplicación del sistema de tubos Venturi o bombas de superficie en la amazonia ecuatoriana, su principal objetivo fue reducir la contrapresión producida por el pozo y optimizar su producción. Por motivos de confidencialidad se cambiaron los nombres reales y ubicación, debido a las normas y restricciones de la empresa a cargo del pozo.

Existen muchos problemas asociados a la productividad de un pozo, uno de ellos radica en el exceso de presiones de la formación y en la superficie como la intrusión violenta del fluido acompañado de agua, petróleo, gas y solidos abrasivos como arenas provenientes de la formación del pozo hacia el cabezal de producción y posteriormente hacia las líneas de superficie.

Esto ocasiona daños severos a equipos de superficie como manómetros de presión, medidores de caudal, sobrepresiones en líneas de superficie incrementando la velocidad de erosión, corrosividad, así como daños en válvulas y otros componentes, generando fugas y deterioro de las tuberías.

Las sobrepresiones del pozo afectan directamente a la producción del pozo aumentando los gastos de operatividad y control reduciendo su máximo potencial. Por lo cual, es indispensable proponer una alternativa que permita aumentar la producción.

El fluido motriz como se había mencionado en la metodología puede ser agua o gas. En este caso, el cual consiste en reducir la presión del pozo y obtener una mayor producción de petróleo requerimos de un fluido a alta presión como lo es el agua.

En cuanto a su disponibilidad este se puede obtener de un acuífero o un pozo cercano con alto corte de agua el cual servirá como fuente de energía, lo cual podemos encontrar en el campo que se está analizando.

En cuanto a los parámetros requeridos para el desarrollo del proyecto estos se pueden observar en la fig. 3.1, correspondientes al pozo dark hole, en su reservorio productor presenta presiones de 1400 [Psia], temperatura de 180 [°F], API de 24.2, datos que definen el tipo de reservorio. Otro parámetro importante es la presión de burbuja [Pb] ya que, delimita un punto de transición de la región de crudo saturado y subsaturado.

Presiones mayores al [Pb] el caudal de crudo se considera subsaturado, mientras que presiones menores al [Pb] es saturado.

Para el desarrollo de la propuesta del dispositivo Venturi es muy importante el análisis correspondiente a los parámetros del fluido motriz, sobre todo por que nos permitirá obtener una mejor performance al momento del diseño de la bomba, es importante no sobrepasar la [Pb].

El exceso de presiones genera problemas de cavitación reduciendo la eficiencia de la bomba como consecuencia de la formación de gas al interior del sistema. Respecto a los parámetros mecánicos del pozo se cuenta con una bomba tipo jet directa aplicable a cualquier tipo de pozos verticales, direccionales o horizontales. Parámetros como la profundidad de la bomba y profundidad del reservorio nos permiten calcular una óptima geometría y diseño de la bomba, a demás posibilitan la determinación del nivel estático y dinámico del fluido.

Fig. 3.1 Parámetros requeridos para el desarrollo del proyecto

DATOS DEL POZO			PARÁMETROS DEL FLUIDO MOTRIZ		
Formación:	T		Sistema de bombeo hidráulico:	Power oil	
Fluido:	Petróleo y agua		Modo de cálculo:	Presión de fondo fluyente fija	
Correlación PVT:	Standing		Presión de inyección:	3319.791	Psia
Viscosidad del petróleo:	Beggs y Robinson		Temperatura de inyección:	100.000	°F
Viscosidad del agua:	Van Wingen		Caudal de inyección:	2439.715	STB/day
Viscosidad del gas:	Carr		BSW de inyección:	89.000	%
Flujo monofásico:	Moody		Salinidad:	23600.000	ppm
Flujo multifásico:	Beggs and Brill		Gravedad específica del agua:	1.016	adim
			API del fluido de inyección:	10.000	°API
DATOS DEL RESERVORIO			PARÁMETROS MECÁNICOS POZO		
Presión:	1400.000	Psia	Tipo de bomba jet:	Directa	
Temperatura:	180.000	°F	Profundidad de la bomba, MD:	9254.930	ft
Gravedad API:	24.200	°API	Profundidad del reservorio, MD:	9689.500	ft
Gravedad específica del agua:	1.016	adim	Profundidad del sensor, MD:	0.000	ft
Gravedad específica del gas:	0.890	adim			
RGP en solución:	92.000	scf/STB	PARÁMETROS PRODUCCIÓN		
			Caudal de diseño:	358.000	STB/day
			Presión de retorno:	150.000	Psia
			Presión de fondo fluyente:	755.240	Psia
			BOMBA DE SUPERFICIE		
			Eficiencia de la bomba de superficie:	80.000	%

Evaluación del diseño hidráulico y selección de bomba:

Inicialmente se realizó una prueba con diversas geometrías con el propósito de establecer las condiciones operativas óptimas que no afecten al sistema de tuberías Venturi. En este caso representado en la siguiente tabla 3.1 podemos observar distintas configuraciones geométricas las cuales permiten manejar diferentes caudales de inyección y producción, la geometría 8N parecería ser la más factible para ser aplicada debido al elevado caudal de descarga.

Tabla. 3.1 Prueba comparativa analizando diversas geometrías de la bomba

GEOMETRÍA	TIEMPO PRUEBA [HORAS]	INYECCIÓN		DESCARGA		SUCCIÓN	
		PRESIÓN [PSI]	CAUDAL [BPD]	PRESIÓN [PSI]	CAUDAL [BPD]	PRESIÓN [PSI]	CAUDAL [BPD]
8J	8	1550	448	150	626	4	178
8N	85	1500	494	125	881	4	386
9O	130	1500	661	110	1142	4	480
9P	335	1000	555	110	937	4	384

Sin embargo, es muy importante que la P_{wf} (Presión de fondo fluyente) se encuentre por encima del P_b (Punto de burbuja), para evitar problemas de cavitación garantizando de esta manera un óptimo rendimiento y durabilidad de la bomba. En este caso la geometría 9P posee una capacidad similar a la 8N, pero trabaja de manera óptima con una menor potencia hidráulica.

La tabla 3.2 presenta los resultados proporcionados por el software syal, en este caso se decide cambiar la geometría a 11J ya que cumple con varios requerimientos óptimos de diseño. Por ejemplo, la presión de fondo fluyente ya que está por encima y muy cercana al punto de burbuja con un valor de 755 por tanto me garantiza que no tendré problemas de cavitación a futuro.

Por otro lado, tenemos un vgl (relación de flujo volumétrico gas/liquido del fluido producido) muy seguro para seleccionar la bomba por estar dentro del rango óptimo [0-5], la tabla nos muestra un vgl de 0 lo cual representa una fase líquida por consiguiente tenemos garantizado una mayor eficiencia de la bomba jet y una menor potencia requerida.

Tabla 3.2 Informe de prueba en software Syal aplicando una geometría 11J

Geometría	11 J	11 J
Presión de inyección (Psia)	3065.218	3319.791
Caudal de inyección (STB/day)	2391.483	2439.715
Caudal de diseño (STB/day)	358.000	358.000
Pwf (Psia)	755.240	755.240
Presión de entrada (Psia)	602.242	602.242
Presión descarga (Psia)	3684.609	3817.327
Caudal de cavitación (STB/day)	689.987	689.987
Eficiencia bomba jet (%)	17.105	16.878
Vgl (adim)	0.000	0.000
Potencia requerida (HP)	155.771	172.111
Tipo de bomba jet	Directa	Directa

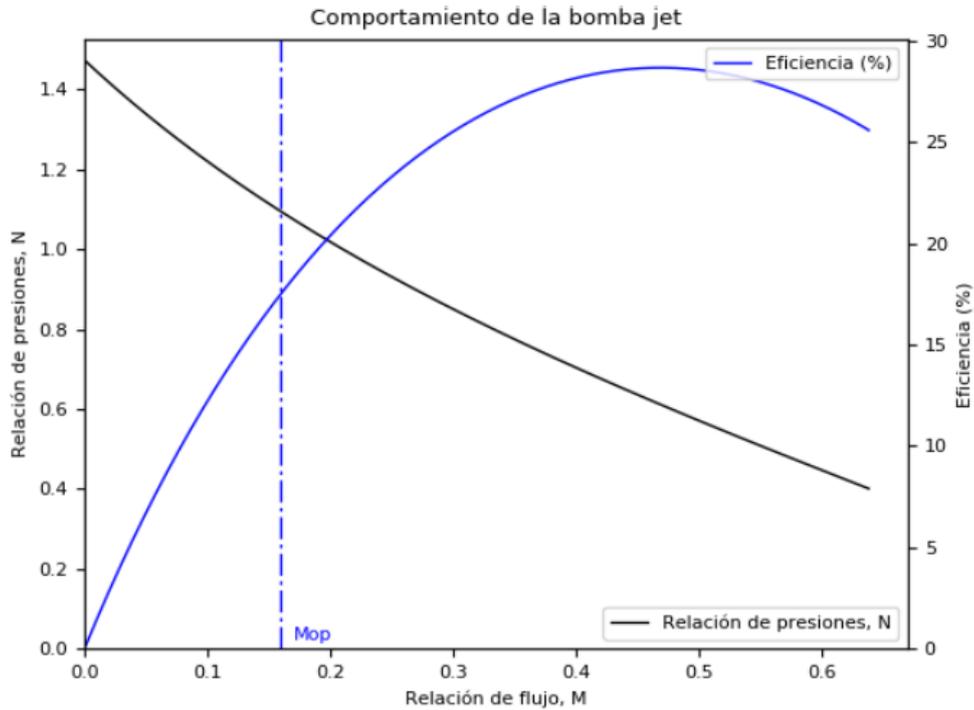
La fig. 3.2 representa el comportamiento de la bomba jet a través de una gráfica relación de presiones vs relación de flujo, aplicando una configuración geométrica diferente en este caso se implementó una 11 J.

la curva de color negra representa la relación de presiones, la curva de color azul nos muestra la eficiencia de la bomba en porcentaje, normalmente vemos esta línea con una bomba que aumenta hasta su máxima eficiencia y luego empieza a disminuir nuevamente.

La eficiencia es la relación entre la cantidad de energía que entra en la bomba contra la cantidad de energía que sale de la bomba, así que lo ideal es que esto sea lo más cercano al pico para tener una mayor eficiencia mecánica de la bomba jet y una menor potencia requerida.

Por lo general las bombas no son tan eficientes, esto se debe a las altas pérdidas inherentes que resultan de la conversión de energía cinética en energía de flujo, una bomba con mucho caudal tiene tendencia a cavitarse.

Fig. 3.2 Comportamiento de la bomba Jet



Proporcionada por Syal

La tabla 3.4 muestra valores correspondientes al comportamiento de la bomba jet, el eje vertical representa la relación de presiones N, el eje horizontal la relación de flujo M. A medida que la relación de flujo aumenta, su relación de presiones va disminuyendo. Podemos ver el nivel de eficiencia para cada relación de flujo

Tabla 3.4 Valores correspondientes de la gráfica comportamiento de la bomba jet

Relación de flujo, M: $M = Q_{suc.}/Q_{iny.}$	Relación de presiones, N: $N = (P_{desc.} - P_{suc.})/(P_{iny.} - P_{desc.})$	Eficiencia (%)
0.000	1.473	0.000
0.003	1.464	0.470
0.016	1.428	2.292
0.019	1.419	2.734
0.022	1.410	3.170
0.035	1.376	4.860
0.045	1.351	6.074
0.071	1.288	9.097
0.093	1.236	11.504
0.112	1.193	13.403

0.122	1.172	14.299
0.132	1.152	15.161
0.144	1.125	16.259
0.161	1.093	17.551
0.170	1.075	18.285
0.173	1.068	18.523
0.180	1.056	18.989
0.215	0.991	21.325
0.228	0.969	22.084
0.241	0.947	22.796
0.257	0.920	23.622
0.270	0.899	24.234
0.273	0.893	24.380
0.302	0.848	25.578
0.347	0.780	27.035
0.356	0.766	27.285
0.392	0.715	28.021
0.405	0.698	28.219
0.417	0.680	28.381
0.437	0.654	28.557
0.446	0.641	28.614
0.456	0.628	28.652
0.459	0.624	28.660
0.494	0.579	28.603
0.514	0.554	28.460
0.549	0.510	27.992
0.559	0.498	27.818
0.597	0.451	26.923
0.623	0.420	26.146
0.626	0.416	26.038
0.632	0.408	25.817
0.639	0.400	25.586

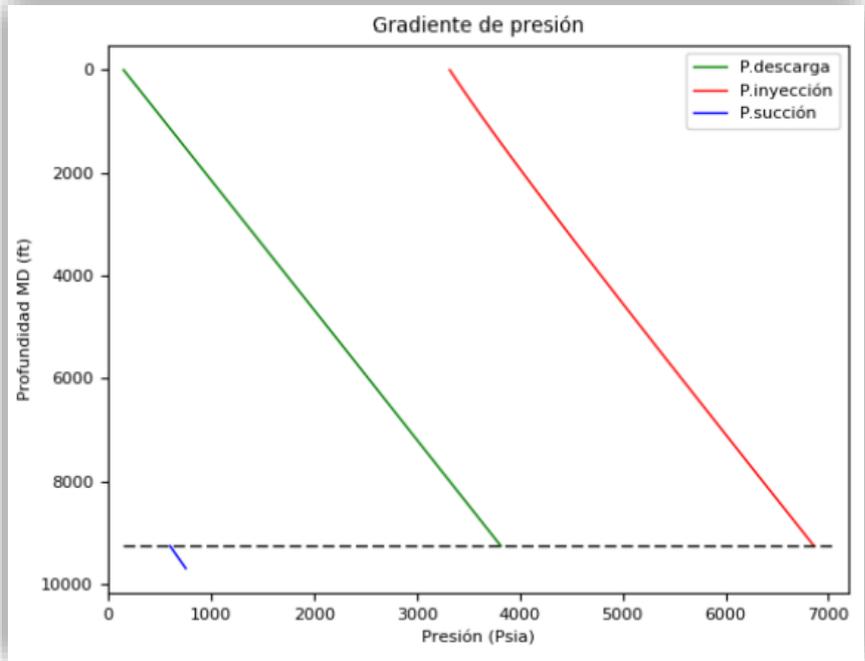
La curva de gradiente de un fluido representa las presiones que el fluido tiene a lo largo de la tubería que lo contiene, nos permite visualizar la variación de presión del fluido en todos los puntos de la tubería, entre los factores que afectan las curvas de gradiente en la tubería es el efecto de la tasa de flujo ya que, a mayores tasas de flujo sus pérdidas

serán mayores sin embargo cuando la tasa es muy pequeña el deslizamiento del líquido aumenta.

El efecto de la energía cinética por lo general en muchos casos resulta ser pequeño, por lo general ocurre a bajas presiones donde causa un aumento en las pérdidas de presión. A continuación, se muestra la fig. 3.3 la cual muestra la presión de los fluidos a distintas profundidades, tenemos el eje de presión el cual va de izquierda a derecha y el de la profundidad de arriba hacia abajo.

respecto al gradiente de presión proporcionada por syal, profundidades mayores requieren altas presiones, la recta roja representa presión de inyección, la presión de descarga representada de color verde indica un comportamiento similar pero menor a la de inyección, si $P < P_b$ tenemos condiciones de flujo multifásicos en P_{wf} y P descarga. Lo cual representaría problemas asociados a cavitación debido al movimiento de gas libre y líquido.

Fig. 3.3 Grafica correspondiente al gradiente de presión



Proporcionada por Syal

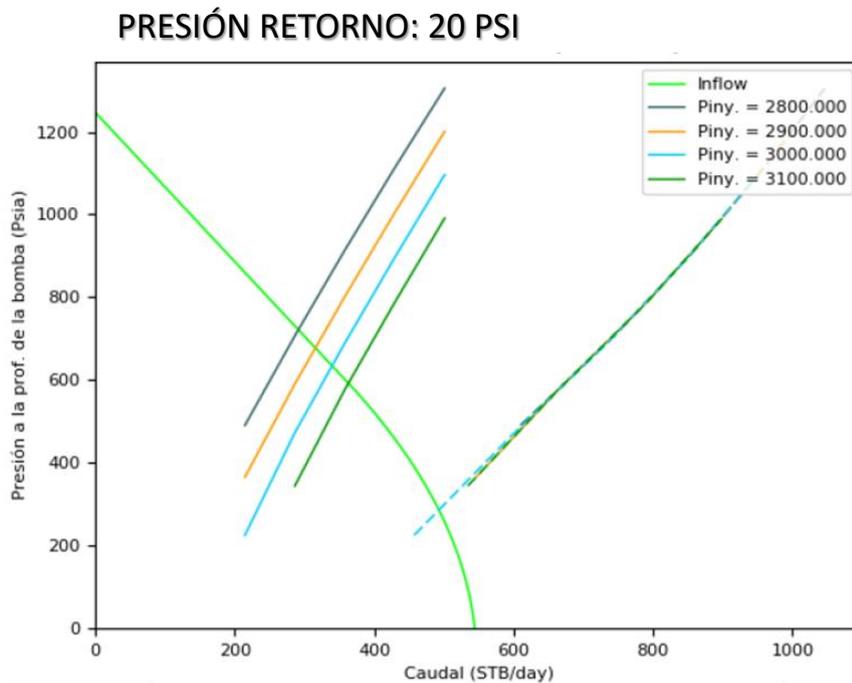
Análisis Nodal

El procedimiento del análisis nodal tiene múltiples aplicaciones, como la selección de líneas de conducción, pozos con sistema de levantamiento artificial, análisis de problemas en restricciones, diseño de sistemas de levantamiento artificial. Las ventajas de su aplicación permiten evaluar y visualizar la respuesta del sistema a la variación de los parámetros de diseño y operación.

A continuación, se presenta la configuración del análisis nodal a nivel de la bomba jet. Como puede observarse en la fig. 3.4, lo primero que notamos en el eje vertical, tenemos la presión a la profundidad de la bomba y en el eje horizontal el caudal o la cantidad de agua que puede mover la bomba.

la curva verde claro representa la inflow section (sección de entrada), las presiones de inyección corresponden a un flujo monofásico puesto que, tocan la curva de producción. Conforme aumente la presión de inyección es muy probable que ocurra un flujo multifásico movimiento de gas libre y liquido como se aprecia al instante que la curva supera los 3000 psi.

Fig. 3.4 Gráfica: presión a la profundidad de la bomba vs caudal



Proporcionada por Syal

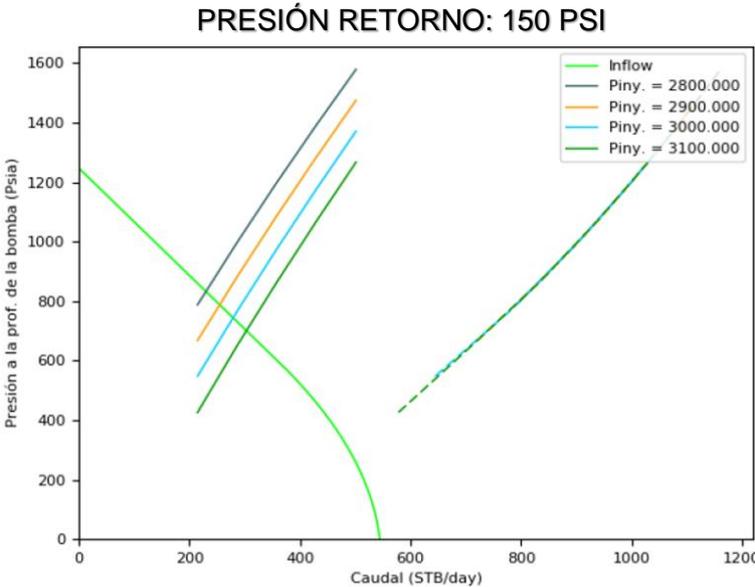
La tabla 3.5 correspondiente al resultado del informe final proporcionado por el software Syal representa los puntos de corte entre la curva inflow y las curvas de la bomba para una presión de retorno de 20 psi. Se puede ver como el caudal aumenta como consecuencia de que la presión de succión va disminuyendo a medida que la presión de inyección se incrementa.

Tabla. 3.5 Informe final del análisis nodal para una presión de retorno de 20 psi

$P_{iny.}$ [<i>Psia</i>]	Caudal [<i>STB/day</i>]	$P_{suc.}$ [<i>Psia</i>]
2800.000	292.602	720.068
2900.000	317.667	674.924
3000.000	342.731	629.780
3100.000	365.071	589.461

A una presión de retorno correspondiente a 150 psi como se describe en la fig. 3.5, la curva verde la cual representa la relación entre la presión de fondo fluvente y la tasa de flujo y define el rango de presión que va desde la presión promedio del reservorio hasta la presión atmosférica. Se evidencia que a presiones mayores a 3100 psi ya no toca la curva inflow, es decir la presencia de gas es el medio continuo. Para aumentar la producción se debe disminuir la presión fluvente.

Fig. 3.5 Gráfica: presión a la profundidad de la bomba vs caudal



Proporcionada por Syal

En el informe final correspondiente a la tabla 3.6 obtenemos el rango de presiones y caudal para una presión de retorno de 150 psi. La presión de inyección con mayor caudal corresponde a 3100 [psi], a diferencia del caso anterior notamos que la curva final ya no toca la curva de producción, esto se debe a que solo existe presencia de gas. Lo recomendable es no sobrepasar este rango de presiones para evitar cavitación.

Tabla 3.6 Informe final análisis/nodal

$P_{iny.}$ [<i>Psia</i>]	Caudal [<i>STB/day</i>]	$P_{suc.}$ [<i>Psia</i>]
2800.000	228.851	834.890
2900.000	255.550	786.802
3000.000	280.070	742.640
3100.000	304.589	698.477

La siguiente tabla 3.7 proporciona los rangos evaluados respecto a la presión de descarga, presión de inyección y profundidad. Una mayor presión de inyección del fluido motriz produce un cambio abrupto con respecto a la presión del fluido secundario proveniente del pozo, esto se debe al cambio repentino de energía cinética del fluido al momento de ser inyectado a la cámara de mezcla del dispositivo Venturi.

Conforme aumente la presión a la profundidad de la bomba se requiere una mayor presión de inyección del fluido motriz, es importante considerar que al inyectar elevadas presiones el sistema es propenso a alcanzar condiciones de flujo multifásicos como resultado del movimiento de gas libre y de líquido, no se recomienda trabajar con presiones muy elevadas para evitar desgaste optimizando el rendimiento de la bomba.

Tabla 3.7 Datos proporcionados por software syal respecto a profundidad, presión de inyección y descarga.

Profundidad MD [Ft]	Presión descarga [Psia]	Presión inyección [Psia]
0.000	150.000	3319.791
237.000	244.415	3399.049
474.000	338.732	3480.095
711.000	433.028	3562.674
949.000	527.306	3646.581
1423.000	715.810	3817.682

La siguiente tabla 3.8 muestra la relación respecto a la variación del caudal de producción de fluido del reservorio y la presión fluyente, esta curva permite establecer los rangos de presión los cuales van desde la presión promedio del reservorio hasta la presión atmosférica, como se evidencia a continuación, inicialmente la bomba empuja contra el agua y la fricción por tanto no hay caudal saliente de la bomba pero existe una presión máxima, este informe es muy necesario ya que al bombear el fluido a través de las tuberías y accesorios la fricción siempre tiende a oponerse al flujo ocasionando las perdidas de presión y pérdida de energía de la bomba, el caudal es la medida de cantidad del líquido el cual fluye de la bomba en un tiempo determinado.

Para alcanzar una mayor producción se debe disminuir la presión fluyente o presión a la profundidad de la bomba.

Tabla 3.8 Influjo a diferentes tasas de caudal y presión a la profundidad de la bomba.

Inflow	
Caudal [STB/day]	Presión a la Prof. De la bomba [Psia]
0.000	1247.073
49.584	1157.767
99.169	1068.460
148.753	979.154
198.337	889.848
247.922	800.542

297.506	711.235
347.090	621.929
396.674	528.876
446.259	419.067

La tabla 3.9 descrita a continuación representa el análisis respecto al caudal de cavitación, caudal de producción y presión de succión de la bomba. El propósito de la prueba consiste en estudiar la eficiencia de la bomba. Uno de los factores que tiene gran influencia en la cavitación es la succión.

Una de las formas más concisas en la determinación de la cavitación consiste en el registro de las lecturas de presión de succión, a una presión de inyección inicial de 2800 psi se presenta un registro respecto al caudal de producción siendo el valor de 429.6 [STB/day] el más alto. Sin embargo, el caudal de cavitación sigue siendo muy elevado por lo tanto se recomienda incrementar la presión de inyección.

Tabla 3.9 Resultado Presión de succión a una presión de inyección de 2800 [Psia].

Presión a la profundidad de la bomba con $P_{iny.} = 2800.000$ [Psia]		
Caudal de producción [STB/day]	Caudal de cavitación [STB/day]	$P_{suc.}$ [Psia]
214.800	902.640	787.739
286.400	998.782	997.591
358.000	1084.003	1198.375
429.600	1161.023	1391.649

La siguiente tabla 3.10 nos presenta un análisis similar al descrito en la tabla anterior, ahora tenemos una presión a la profundidad de la bomba con una presión de inyección de 2900 [psi]. el registro de las lecturas respecto al caudal de producción sigue siendo el mismo que la tabla anterior, pero registra valores con respecto al caudal de cavitación y presión de succión más bajos.

Inicialmente existe una diferencia notable en el caudal de cavitación, esto se debe a que al aumentar progresivamente la presión de inyección disminuye la presión de fondo

generando mayor drawdown, en este caso la presión de succión del fluido motriz del pozo sigue generando caudales de cavitación elevados.

Tabla 3.10 Resultado Presión de succión a una presión de inyección de 2900 [Psia].

Presión a la profundidad de la bomba con $P_{iny.} = 2900.000[Psia]$		
Caudal de producción [STB/day]	Caudal de cavitación [STB/day]	$P_{suc.}$ [Psia]
214.800	842.901	667.832
286.400	946.413	881.881
358.000	1037.322	1086.807
429.600	1118.866	1284.070

La presión a la profundidad de la bomba con una presión de inyección de 3000 [Psia] descrita en la tabla 3.11 presenta valores reducidos referentes a caudal de cavitación y presión de succión respecto a la presión inicial de 2800 [Psia], analizando las presiones anteriores vemos el comportamiento de las curvas de presión tienden a disminuir su caudal de cavitación y aumentar la presión de succión.

Tabla 3.11 Resultado Presión de succión a una presión de inyección de 3000 [Psia].

Presión a la profundidad de la bomba con $P_{iny.} = 3000.000[Psia]$		
Caudal de producción [STB/day]	Caudal de cavitación [STB/day]	$P_{suc.}$ [Psia]
214.800	779.163	547.971
286.400	891.316	766.124
358.000	988.581	975.120
429.600	1075.109	1176.297

Finalmente obtenemos una última prueba a una presión de inyección de 3100[Psia] como se presenta en la tabla 3.12. La cual es la más óptima del sistema ya que se encuentra

dentro del rango de presión la cual va desde la presión promedio del reservorio hasta la presión atmosférica garantizando una producción y eficiencia optima de la bomba.

El mejor rendimiento se da obteniendo una presión de succión de 425.74 [Psia], pese a que no se obtenga un mayor caudal de producción como se evidencia para una presión de succión de 1068.368 [Psia], se debe priorizar el valor que no genere exceso de cavitación logrando así que el flujo no alcance un régimen multifásico y que la presencia de gas libre afecte el sistema de la bomba.

Tabla 3.12 Resultado Presión de succión a una presión de inyección de 3100 [Psia].

Presión a la profundidad de la bomba con $P_{iny.} = 3100.000$ [Psia]		
Caudal de producción [STB/day]	Caudal de cavitación [STB/day]	$P_{suc.}$ [Psia]
214.800	710.551	425.745
286.400	832.985	650.400
358.000	937.515	863.350
429.600	1029.580	1068.368

Comparación de pruebas de producción con su línea base

La fig. 3.6 muestra una evaluación al pozo mediante la implementación del dispositivo Venturi, inicialmente se obtuvo una producción de 384.49 [BFPD] y una prueba final transcurrido 24h con una producción de 376.10 [BFPD]. Finalmente se obtuvo un valor de 371 [BFPD] una vez que se mantuvo estable el caudal de producción.

Mientras que en una evaluación normal aplicada al tanque y al manifold se obtiene una producción de 389 [BFPD] y 373 [BFPD] alcanzando una producción estable de 349 [BFPD] por tanto se aprecia claramente una diferencia en su producción final.

Fig. 3.6 Esquema comparativo analizando ambas pruebas de producción



La tabla 3.13 nos muestra que fue necesaria la evaluación al tanque por 20 h y al manifold 4 h para determinar la producción sin aplicar el dispositivo Venturi dando un resultado de 349 BFPD, por consiguiente, las pérdidas de producción equivalen a 22 BFPD. Mientras que con la implementación del nuevo sistema el valor de 371 BFPD la transferencia de fluido y el nivel del tanque se mantienen estables.

Tabla 3.13 Comparativa entre ambos sistemas de producción

Producción sin dispositivo Venturi [BFPD]	349
Producción con dispositivo Venturi [BFPD]	371
GANANCIA [BFPD]	22

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Se realizó el análisis de la propuesta para un pozo con alta presión y se evidenció que la aplicación del sistema de tuberías Venturi permite reducir la contrapresión del cabezal.
- Comparando la línea base que no posee el sistema Venturi con el sistema aplicado se obtuvo una ganancia de 22 barriles ya que originalmente se producían 349 barriles y el sistema de reducción de presión permite alcanzar una producción de 371 barriles.
- Mediante la implementación del software syal se presentó un análisis nodal al sistema de producción con el propósito de conocer su performance a condiciones del tanque y el manifold con una geometría de 11J a presiones de retorno de 20 [Psia] y 150 [Psia]
- El análisis de los resultados demostró mediante las pruebas al pozo darkhole, una ganancia de 22 BFPD. Además estabilizar la presión del manifold. Por tanto, el sistema es seguro y gran aporte para la optimización de crudo.
- La implementación de un sistema de tuberías Venturi es mucho más flexible y adaptable a cualquier tipo de sistema de superficie ya que en comparación con un sistema de levantamiento artificial hidráulico tipo pistón, no posee muchas partes móviles en su interior que lo vuelvan vulnerable al manejo de sólidos abrasivos y aumenten su costo por mantenimiento operacional.

4.2 Recomendaciones

- Tomar precaución al momento de seleccionar el tipo de geometría de la bomba, siempre mantenerse por encima del punto de burbuja ya que de no cumplirse podría generar problemas de cavitación.
- Podría implementarse para despresurizar líneas de superficie con alto contenido de gas o agua.
- Serviría de mucho para erradicar la quema de gas del mechero en las estaciones de servicio, contribuyendo al medio ambiente.
- La búsqueda de nuevos materiales para su fabricación interna sería de gran ayuda puesto que podría reducir la turbulencia producida por las elevadas presiones de inyección, reduciendo así problemas asociados a corrosión o desgaste de la boquilla.
- Debido a su principio físico de diseño, es posible darle otros usos como el de transferencia de fluidos, limitando el uso frecuente de transporte cisterna y bombas de transferencia.
- Dependiendo del uso que se le dé y la calidad del fluido motriz disponible, es posible implementarlo en procesos de reinyección y mejora del recobro en procesos de reinyección.

BIBLIOGRAFÍA

- (Brown, K. E. (s.f.). *The technology of artificial lift methods* (Vol. 2B). Tulsa: PennWell Books.)
- Yunus Cengel (5 ed.)
- Pugh Toby. (2008). Hydraulic Jet Pumping. [Online]. Disponible en: <https://search.spe.org>
- Sertecpet. (2015). Manual de Operación MTU
- Jet pump geometry selection. Artículo presentado en 85th EDDIE E. SMART Guiverson Division, Dresser Industries, Inc. Presened at the southwestern petroleum short course, department of petroleum engineering, texas tech university. Lubbock, texas.
- Journal of fluids engineering. Accedido el 3 de marzo, 2015, desde <http://fluidsengineering.asmedigitalcollection.asme.org>.
- American Oil and Gas Reporter Magazine
- Syed M Peeran, Dr Najam Beg & Sacha Sarshar, Caltec Ltd UK, “Novel Examples of the use of Surface Jet Pumps (SJPs) To Enhance Production & Processing: Case Studies and Lessons Learned”, en Manama, Bahrain, 10-13 March 2013. © Society of Petroleum Engineers 164256.
- Sacha Sarshar, and N. Beg, Caltec, U.K, “Production Enhancement And Assurance Using Surface Jet Pump Technology”, en Manama, Bahrain, 8-11 March 2015. © Society of Petroleum Engineers 172615.
- Rivas, I. (Diciembre, 2001). Tubos Venturi, Dall y Tobera. Comisión Nacional del Agua (CNA, México). [Online]. Disponible en: <http://repositorio.imta.mx>
- Marcelo Hirschfeldt. (2009). Recopilación y resumen de textos de los siguientes autores: H. Dale Beggs, Kermit E. Brown y James F. Lea [Online]. Disponible en: www.oilproduction.net
- Alberto Rodríguez. (27 octubre, 2014). Análisis técnico – Principio de Bernoulli. [Online]. Disponible en: <https://albrodpulf1.wordpress.com>

- Weatherford. S.f. (24 Junio,2013). Sistemas de Bombeo Hidráulico. [Online]. Disponible en:
<http://www.weatherford.com/weatherford/groups/web/documents/weatherfordcorp/WFT015205.pdf>