



UNIVERSIDAD ESTATAL PENINSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA EN PETRÓLEO

TEMA:

**OPTIMIZACIÓN DE BOMBEO HIDRAULICO TIPO JET POR EL
METODO E. SMART EN EL CAMPO ARCAN-5.
PROYECTO PRÁCTICO DEL EXAMEN COMPLEXIVO.**

“CASO PRÁCTICO”

AUTOR:

BRYAN ANDRÉS DEL PEZO BORBOR.

TUTOR:

Ing. HUMBERTO COROMOTO PEÑA RIVAS, PhD.

LA LIBERTAD – ECUADOR

2021

**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA
ELENA**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA EN PETRÓLEO**

PROYECTO PRÁCTICO DEL EXÁMEN COMPLEXIVO

TEMA:

**OPTIMIZACIÓN DE BOMBEO HIDRAULICO TIPO JET POR EL
METODO E. SMART EN EL CAMPO ARCAN-5.**

AUTOR:

BRYAN ANDRÉS DEL PEZO BORBOR.

TUTOR:

Ing. HUMBERTO COROMOTO PEÑA RIVAS, PhD.

LA LIBERTAD – ECUADOR

2021



Santa Elena, 13 de marzo 2021

CARTA DE ORIGINALIDAD

Ing. Marllelis Gutierrez Hinestroza, PhD

Directora de la Carrera de Petróleos

Universidad Estatal Península de Santa Elena

Cumpliendo con los requisitos exigidos, envío a Uds. La Tesina Titulada **“OPTIMIZACIÓN DE BOMBEO HIDRAULICO TIPO JET POR EL METODO E. SMART EN EL CAMPO ARCAN-5”**, para que se considere la Sustentación, señalando lo siguiente:

1. La investigación es original.
2. No existen compromisos ni obligaciones financieras con organismos estatales ni privados que puedan afectar el contenido, resultados o conclusiones de la presente Investigación.
3. Constatamos que la persona designada como autor es el responsable de generar la versión final de la investigación.
4. El Tutor certifica la originalidad de la investigación y el desarrollo de la misma cumpliendo con los principios éticos.

Autor: Bryan Andrés Del Pezo Borbor

N° de Cédula: 0202018560

Correo: bryandbordp@gmail.com

bryan.delpezoborbor@upse.edu.ec

Tutor: Humberto Coromoto Peña Rivas
PHD

N° de Cédula: 1757625635

Correo: hcpr100027@gmail.com

AGRADECIMIENTO

A Dios, por permitirme llegar hasta aquí, siendo clave importante en todo esto, pues me ha brindado salud y la fuerza para nunca rendirme antes las adversidades de la vida.

A mi Madre, siendo ella quien me aconsejo, me cuido y la quien siempre fue un ejemplo a seguir, ella es símbolo de perseverancia pues nunca se rinde ante nada.

A la UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA, por abrirme sus puertas, por brindarme el conocimiento necesario para poder ser un profesional excelente.

A mi tutor, quien me ha guiado, orientado y quien me brindó sus conocimientos para la elaboración del presente trabajo.

A mis amigos, quienes han estado en las buenas y las malas, con ellos aprendí el valor de la amistad.

RESUMEN

Este proyecto de titulación se basa en el desarrollo de un método práctico, para la elección de la mejor combinación del diámetro de tobera y garganta, el cual beneficia al método de recuperación de bombeo hidráulico tipo jet, para llegar a esto se usó el método de Eddie Smart, con el cual al obtener el diámetro optimizado reduciría el gasto en fluido motriz, y prevendría el daño por cavitación, además del aumento de producción de petróleo.

En el capítulo I se detalló la exposición del caso práctico, donde se estableció que en el campo ARCAN-5 existía una reducción en la producción de hidrocarburos, donde el método para resolver esta problemática fue el de Eddie Smart, quien nos permitiría optimizar los diámetros de las bombas, para que no exista un mal funcionamiento del método de recuperación hidráulico tipo jet.

En el capítulo II se establecieron los pasos a seguir del método Eddie Smart, para obtener el área ideal de tobera y garganta de la bomba tipo jet, haciendo también una comparación con los diversos fabricantes que existen en el mercado, las cuales son: Claw, Kobe, Guiberson, Oilmaster, Oilwell.

En el capítulo III, se presentó los resultados obtenidos con el método Eddie Smart, dándonos la mejor elección de bomba de los diversos fabricantes, también se demostró que el fluido motriz usado era menor al actual en los campos analizados y el caudal esperado incrementó su producción.

Palabras claves: optimización, geometría, cavitación, fabricantes de bombas.

ABSTRACT

This titration project is based on the development of a practical method to choose the best combination of the nozzle and throat diameter, which benefits the jet-type hydraulic pump recovery method. To achieve this, the method of Eddie Smart, with which, by obtaining the optimized diameter, it would reduce the expense in motive fluid, and prevent the damage by cavitation, in addition to the increase in oil production.

In chapter I the presentation of the practical case was detailed, where it was established that in the ARCAN-5 field there was a reduction in the production of hydrocarbons, where the method to solve this problem was that of Eddie Smart, who would allow us to optimize the diameters of the pumps, so that there is no malfunction of the jet-type hydraulic recovery method.

In chapter II the steps to follow of the Eddie Smart method were established, to obtain the ideal area of the nozzle and throat of the jet pump, also making a comparison with the various manufacturers that exist in the market, which are: Claw, Kobe, Guiberson, Oilmaster, Oilwell.

In chapter III, the results obtained with the Eddie Smart method were presented, giving us the best choice of pump from the various manufacturers, and it was also shown that the motive fluid used was less than the current one in the analyzed fields and the production flow increased.

Keywords: optimization, geometry, cavitation, pump manufacturers.

ABREVIATURAS Y SIGLAS

API: American Petroleum Institute.

A_{CM} : Área anular mínima en la succión para cavitación (pg^2).

A_N : Área de flujo de la tobera (pg^2).

A_S : Área anular de la cámara de mezclado para el flujo de la producción (pg^2).

A_T : Área de flujo total de la cámara de mezclado (pg^2).

BES: Bombeo electro-sumergible

B_g : Factor volumétrico del gas (PC/PCS).

BHJ: Bombeo hidráulico tipo jet

Bl: barriles

B_o : Factor volumétrico del petróleo (bl/BF).

B_T : Factor volumétrico total (bl/BF).

B_W : Factor volumétrico del agua (bl/BF).

C: Variable definida en función de diámetros D_1, D_2 .

cp : Centipoise.

D: Profundidad vertical verdadera, (pie).

D_{ITP} : Diámetro interno de la tubería de producción (pg).

D_{OTP} : Diámetro externo de la tubería de producción (pg).

D_{ITR} : Diámetro interno de la tubería de revestimiento (pg).

D_{OTR} : Diámetro externo de la tubería de revestimiento (pg).

D_1 : Diámetro interno de la tubería de producción (pg).

D_2 : Diámetro externo de la tubería interior en flujo anular (pg).

D_3 : Distancia entre el centro del tubing y el centro del Casing, flujo anular laminar (pg).

E: Eficiencia

F_O : Fracción de petróleo

F_W : Fracción del agua de formación.

F_{WD} : Fracción del agua del fluido de la columna de retorno.

G_D : Gradiente del fluido de la columna de retorno (psi/pie).

G_o : Gradiente del petróleo producido (psi/pie).

GOR: Relación gas-petróleo (pcs/bl).

GLR: Relación gas-líquido (pcs/bl).

G_N : Gradiente del fluido motriz en la tubería de inyección (psi/pie).

G_s : Gradiente del fluido de formación (psi/pie).

H: Relación adimensional de recuperación de presión.

HP: Potencia, HP

IP: Índice de productividad (BFPD/Psi).

K: Permeabilidad (md)

K_N : Coeficiente de pérdida en la tobera.

K_{TD} : Coeficiente de pérdida combinado de, cámara de mezclado con el difusor.

L: Longitud de T.P. hasta la bomba: Profundidad de colocación de la bomba: h_1 , (pies).

M: Relación de flujo másico adimensional.

M_L : Relación de flujo másico adimensional en el límite de cavitación.

NUM: Variable usada para definir H

P_b : Presión de burbuja (Psi).

PCS: Pie cúbico estándar.

P_D : Presión de descarga (Psi).

P_F : Pérdidas de presión por fricción (Psi).

P_{FD} : Pérdidas de presión por fricción del fluido en el circuito de retorno (Psi).

P_{FN} : Pérdidas de presión por fricción del fluido motriz en la tubería de inyección (Psi).

pg: pulgada

P_N : Presión a la entrada de la tobera (Psi).

P_r : Presión de reservorio (Psi).

P_S : Presión de succión (Psi).

Psi: Libras fuerzas por pulgadas cuadradas.

P_T : Presión superficial de operación: Presión de descarga de la bomba tríples (Psi).

P_{wf} : Presión de fondo fluyente (Psi).

P_{wh} : Presión en la cabeza del pozo (Psi).

q: Q: Caudal (*bl/día*).

Q_D : Tasa del fluido producido más fluid motriz (*bl/día*).

Q_N : Tasa del fluido motriz (*bl/día*).

Q_o : Tasa de petróleo producido (*bl/día*).

Q_S : tasa de fluido producido (*bl/día*).

R: Relación de áreas.

T: Temperatura (°F).

T. P.: Tubería de producción.

T. R.: Tubería de revestimiento.

μ_D : viscosidad dinámica del fluido de retorno (cp).

μ_o : viscosidad del petróleo (cp).

μ_w : viscosidad del agua (cp).

ρ : densidad del fluido (lb/pie³).

ρ_o : densidad del petróleo (lb/pie³).

γ_f : Gravedad específica del fluido motriz, si es agua = 1.

γ_g : Gravedad específica del gas.

γ_w : Gravedad específica del agua.

ÍNDICE

CARTA DE ORIGINALIDAD	III
AGRADECIMIENTO	IV
RESUMEN	V
ABSTRACT	VI
ABREVIATURAS Y SIGLAS	VII
CAPITULO I	1
EXPOSICIÓN DEL CASO PRÁCTICO	1
1.1 OPTIMIZACIÓN DE BOMBEO HIDRAULICO TIPO JET POR EL METODO E. SMART EN EL CAMPO ARCAN-5.	1
1.1.2 PARÁMETRO PARA APLICACIÓN DE BOMBA TIPO JET	2
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	3
1.3 PROBLEMÁTICA	4
1.4 DATOS DEL CAMPO ARCAN-5	6
1.5 MARCO REFERENCIAL DE LA PROBLEMÁTICA	7
1.5.1 FUNDAMENTOS DEL BOMBEO HIDRÁULICO TIPO JET	7
1.5.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	7
1.5.3 CAVITACIÓN EN EL BOMBEO HIDRÁULICO TIPO JET	7
1.5.4 FABRICANTES DE BOMBAS HIDRÁULICAS TIPO JET	8
CAPITULO II: RESOLUCIÓN	12
2.1 MÉTODO DE EDDIE E. SMART.	12
2.1.1 FACTORES EN LA SELECCIÓN DE LA GEOMETRÍA DE UNA BOMBA POR EL MÉTODO SMART	12
2.1.2 ASPECTOS TEÓRICOS DEL BOMBEO HIDRÁULICO TIPO JET.	12
2.2 SELECCIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA BOMBA JET	13
2.2.1 LA CURVA DE COMPORTAMIENTO DE DISEÑO.	14
2.2.2 RELACIONES DE ÁREAS ÓPTIMAS	15
2.3 PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA GEOMETRÍA OPTIMA DE LA BOMBA POR EL MÉTODO EDDIE SMART.	16
2.3.1 PRODUCCIÓN ESPERADA	19
2.3.2 ELABORACIÓN DE LA CURVA IPR	19

2.4 PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA GEOMETRÍA ÓPTIMA PARA EL POZO ARCAN-5	21
2.4.1 SELECCIÓN DE GEOMETRÍAS IDEALES ESCOGIDAS POR LOS DIVERSOS FABRICANTES POR EL MÉTODO SMART PARA EL POZO ARCAN-2A.	30
2.4.2 SELECCIÓN DE GEOMETRÍAS IDEALES ESCOGIDAS POR LOS DIVERSOS FABRICANTES POR EL MÉTODO SMART PARA EL POZO ARCAN-4B.	35
2.4.3 SELECCIÓN DE GEOMETRÍAS IDEALES ESCOGIDAS POR LOS DIVERSOS FABRICANTES POR EL MÉTODO SMART PARA EL POZO ARCAN-2SB.	38
CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE RESULTADOS	39
3.1 RESULTADOS DE GEOMETRIAS DE BOMBAS IDEALES DE CADA FABRICANTE EN LOS POZOS ARCAN-2A, ARCAN-4B Y ARCAN-2SB	39
3.2 REDUCCIÓN DEL FLUIDO MOTRIZ USADO EN EL CAMPO ARCAN-5 USANDO EL METODO EDDIE SMART.	43
3.3 INCREMENTO DE PRODUCCIÓN EN EL CAMPO ARCAN-5 USANDO EL METODO EDDIE SMART.....	43
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	44
CONCLUSIONES	44
RECOMENDACIONES.....	45
BIBLIOGRAFÍA.....	46

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1: PARÁMETROS PARA LA APLICACIÓN DE BOMBEO HIDRÁULICO TIPO JET.....	2
Tabla 2: CARACTERÍSTICAS DEL CAMPO ARCAN-5	6
Tabla 3: CARACTERÍSTICA DE LOS FLUIDOS EN LAS ARENAS T Y U.....	6
Tabla 4: ÁREAS DE TOBERAS Y GARGANTA DE BOMBA JET DE LOS DIVERSOS FABRICANTES.	8
Tabla 5: RELACIONES DE ÁREAS Y ÁREAS ANULARES DE GARGANTA - GUIBERSON.	10
Tabla 6: ÁREAS ANULARES TOBERA – GARGANTA DE NATIONAL.....	11
Tabla 7: ÁREAS ANULARES TOBERA – GARGANTA DE KOBE.....	11
Tabla 8: RELACIONES DE ÁREAS ÓPTIMAS.....	15
Tabla 9: DATOS PARA LA ELABORACIÓN DE LA CURVA IPR.....	20
Tabla 10: DATOS PARA EL PROCEDIMIENTO DEL MÉTODO EDDIE. SMART.....	21
Tabla 11: CON LAS DIFERENTES COMBINACIONES DE TOBERA Y GARGANTA POR CADA FABRICANTE PARA EL POZO ARCAN-2A.	30
Tabla 12: RESUMEN DE RESULTADOS DEL POZO ARCAN-4B DEL CAMPO ARCAN-5.....	33
Tabla 13: CON LAS DIFERENTES COMBINACIONES DE TOBERA Y GARGANTA POR CADA FABRICANTE PARA EL POZO ARCAN-4B.	35
Tabla 14: RESUMEN DE RESULTADOS DEL POZO ARCAN-2SB.....	36
Tabla 15: CON LAS DIFERENTES COMBINACIONES DE TOBERA Y GARGANTA POR CADA FABRICANTE PARA EL POZO ARCAN-2SB.	38
Tabla 16: RESULTADOS DE GEOMETRIAS DE BOMBAS IDEALES DE CADA FABRICANTE PARA EL POZO ARCAN-2A.....	39
Tabla 17: SELECCIÓN DE LA MEJOR GEOMETRÍA DE BOMBA BASANDOSE EN LA EFICIENCIA Y EL GASTO DE FLUIDO MOTRIZ PARA EL POZO ARCAN-2A.	39
Tabla 18: RESULTADOS DE GEOMETRIAS DE BOMBAS IDEALES DE CADA FABRICANTE PARA EL POZO ARCAN-4B.....	40

Tabla 19: SELECCIÓN DE LA MEJOR GEOMETRÍA DE BOMBA BASANDOSE EN LA EFICIENCIA Y EL GASTO DE FLUIDO MOTRIZ PARA EL POZO ARCAN-4B.	40
Tabla 20: RESULTADOS DE GEOMETRIAS DE BOMBAS IDEALES DE CADA FABRICANTE PARA EL POZO ARCAN-2SB.....	41
Tabla 21: SELECCIÓN DE LA MEJOR GEOMETRÍA DE BOMBA BASANDOSE EN LA EFICIENCIA Y EL GASTO DE FLUIDO MOTRIZ PARA EL POZO ARCAN-2SB.	41
Tabla 22: RESULTADOS DE LOS DIFERENTES CAMPOS CON LAS BOMBAS TIPO JET SELECCIONADAS POR EL METODO EDDIE SMART.	42

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1: PARTES DE LA BOMBA HIDRÁULICA TIPO JET.	1
Figura 2: TIPOS DE CAVITACIONES.....	5
Figura 3: NOMENCLATURA DE LA BOMBA JET.	13
Figura 4: CURVAS H – M DE GUIBERSON.....	14
Figura 5: INTERSECCIÓN DE LAS CURVAS DEL COMPORTAMIENTO DE DISEÑO H – M DE GUIBERSON.....	15
Figura 6: CURVA IPR DEL POZO ARC-2A DEL CAMPO ARCAN-5.	20
Figura 7: CAUDAL DE INYECCIÓN USADO POR EL MÉTODO DE BOMBEO HIDRÁULICO TIPO JET, ACTUAL Y PROPUESTO.	43
Figura 8: CAUDAL DE PRODUCCIÓN USADO POR EL MÉTODO DE BOMBEO HIDRÁULICO TIPO JET, ACTUAL Y PROPUESTO.....	43

CAPITULO I

EXPOSICIÓN DEL CASO PRÁCTICO

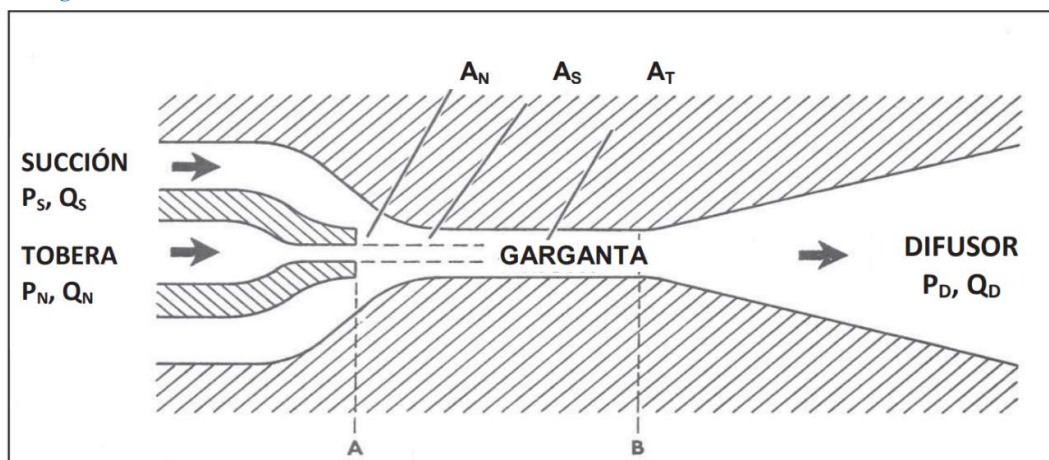
1.1 OPTIMIZACIÓN DE BOMBEO HIDRAULICO TIPO JET POR EL METODO E. SMART EN EL CAMPO ARCAN-5.

En el campo Arcan-5 la energía natural ha ido disminuyendo, debido a la producción de hidrocarburos, lo que ha provocado el decremento de la presión en el yacimiento por lo cual, tuvo que aplicarse un método de recuperación asistida para poder extraer el petróleo in situ.

“El sistema de recuperación usado, fue el levantamiento artificial de bombeo hidráulico tipo jet, el cual basa su funcionamiento en el principio de Pascal, que nos indica que en cualquier punto en el interior de un líquido en reposo la presión es igual en todas las direcciones”.

(ALMEIDA, 2018)“La bomba tipo jet se basa en la inyección de un fluido motriz hasta la profundidad de la bomba de subsuelo donde llega a una alta presión en la tobera, dicha presión se convierte de energía potencial a cinética en forma de chorro a una gran velocidad”, en conclusión, cuando se disminuye la presión aumenta la velocidad del fluido debido a la reducción del diámetro. Esta baja presión en el fluido motriz permite la entrada al pozo de los fluidos del yacimiento, y posteriormente a la superficie.

Figura 1: PARTES DE LA BOMBA HIDRÁULICA TIPO JET.



FUENTE: Levantamiento artificial (Melo, 2014)

Para conseguir el diámetro óptimo de la bomba se usará el método Eddie Smart, con el cual podemos conocer la mejor combinación de tobera y garganta, favoreciendo la velocidad del fluido, y disminuyendo la presión en el fluido motriz, esto permite la entrada de los fluidos de yacimiento y consecutivamente a la bomba de fondo a condiciones de succión.

En el campo Arcan 5 se obtuvo en sus pruebas iniciales un API de 23,5°, para la formación U y de 28 para la formación T, el crudo en la formación U varía entre 23-29° API y el de U entre 21-25, siendo el crudo T de mejor calidad.

1.1.2 PARÁMETRO PARA APLICACIÓN DE BOMBA TIPO JET

Las bombas tipo jet no son aplicadas a todos los pozos, este deberá contar con ciertas condiciones, para el buen funcionamiento de este método de recuperación asistida, una mala elección en este método desembocaría en un colapso de las burbujas de vapor debido al incremento de la presión de la bomba, el cual provocará el fenómeno de daño por cavitación.

Tabla 1: PARÁMETROS PARA LA APLICACIÓN DE BOMBEO HIDRÁULICO TIPO JET.

Parámetro	Bombeo hidráulico tipo jet
Profundidad	1000-18000 pies
Desviación del pozo	Pozos verticales, horizontales o altamente desviados con un ángulo de inclinación hasta 24°/100 pies
Producción	50-15000 BFPD
Temperatura	50°-500°F
Gravedad API	>8° a 45° API
Corte de agua	Rango abierto
GOR	Hasta 2000 pcs/bl
Viscosidad del fluido	Alta viscosidad
Manejo de gas	Bueno
Manejo de sólidos y arena	Regular
Resistencia a la corrosión	Excelente
Aplicación costa afuera	Excelente

REALIZADO POR: Bryan Del Pezo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Describir la mejor opción de la geometría de la bomba jet para la optimización de bombeo hidráulico en el CAMPO ARCAN-5.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

Analizar las características del campo ARCAN-5 y de los pozos los cuales usan el bombeo hidráulico tipo jet.

Determinar la geometría optima de la bomba tipo jet usando el método E. Smart para su deducción.

Seleccionar la mejor opción de los diversos fabricantes de geometrías de bomba.

1.3 PROBLEMÁTICA

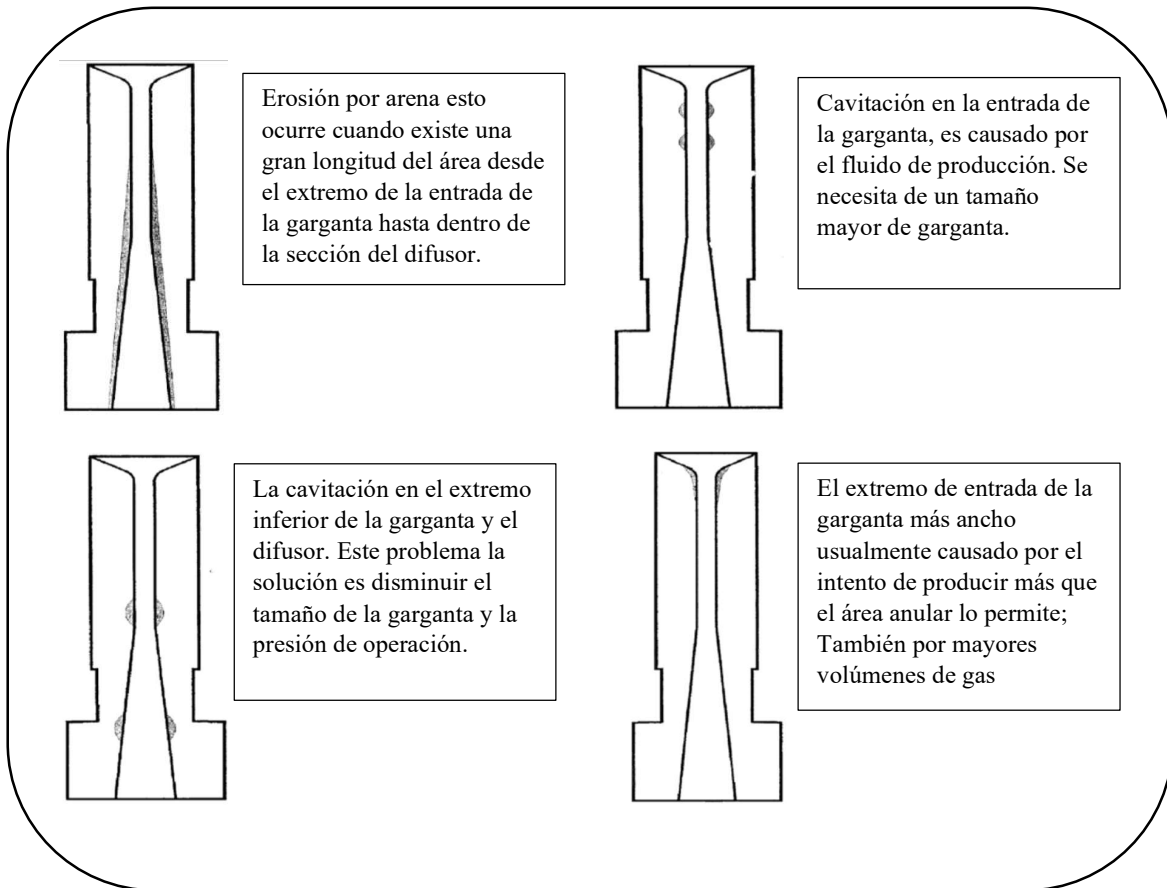
En el campo arcan-5 los pozos en producción están en decaimiento, por lo que se usó un método de recuperación asistida, el cual se eligió de acuerdo a las especificaciones de cada bloque. El levantamiento artificial de bombeo hidráulico tipo jet es el método de recuperación usado en tres pozos los cuales son ARCAN-2A, ARCAN-4B Y ARCAN-2SB, las bombas usadas en cada pozo presentan un alto gasto de fluido motriz, esto nos indica que las bombas elegidas para estos pozos no son las adecuadas, lo cual también puede derivar a problemas de cavitación, por ende, se debe elegir un diámetro de tobera y garganta adecuado teniendo en cuenta los diversos fabricantes que existen en el mercado.

El problema de cavitación, es ocasionado cuando la presión estática del fluido producido dentro de la caja de la bomba es menor a la presión de saturación del fluido, originando cavidades de vapor, las cuales implosionan dentro de la cámara provocando perjuicios y el mal funcionamiento en la bomba.

(Apolo & Díaz, 2014)La cavitación puede presentarse en cualquier momento en un sistema hidráulico, el cual ocurre cuando la producción del pozo acelera su velocidad al ingresar a la garganta, lo que origina una variación de presión las cuales provocan el deterioro en la bomba de fondo.

(Cruz F. B., 2013)La cavitación aparece debido a, que la presión en el punto donde se originan las burbujas disminuye hasta la presión de vapor del líquido en cuestión. El colapso de estas burbujas induce una onda de presión, las cuales no son elevadas, pero los efectos causados en el sistema pueden ser perjudicial, esto a su vez es acompañado por niveles altos de energía, lo que deriva en un efecto de martilleo en los alrededores, los cuales resultan en esfuerzos de fatiga, deformaciones plásticas, y remoción de partículas del cuerpo principal. Dichos efectos son conocidos como, “erosión y corrosión de cavitación”.

Figura 2: TIPOS DE CAVITACIONES.



FUENTE: (VELASCO & DÉFAZ, 2016)

La geometría óptima tiene la finalidad de que la bomba tipo jet trabaje con bajos requerimientos con respecto a potencia, y que no exista cavitación en la bomba.

Para determinar si puede ocurrir la cavitación, la siguiente ecuación (1.1) representa la relación de flujo adimensional en el límite de cavitación, en el cual debe cumplirse que $M < M_L$, para evitar daño en la bomba.

$$M_L = \frac{(1-R)}{R} \sqrt{\frac{P_S}{1,3(P_N - P_S)}} \quad (1.1)$$

1.4 DATOS DEL CAMPO ARCAN-5

Las formaciones productoras del campo arcan-5 es T y U, están formadas de areniscas, las cuales presentan una permeabilidad y porosidad muy buenas para la producción de hidrocarburos.

La formación T está formada de arenisca cuarzosa, donde el tamaño varía de grano medio a fino, el cual presenta una porosidad de 18%, y la formación U posee una arenisca cuarzosa, con porosidad intergranular la cual es de 17,5%.

A continuación, se presenta las características de las formaciones productoras del campo en la tabla 1.1.

Tabla 2: CARACTERÍSTICAS DEL CAMPO ARCAN-5

Datos	T inferior	U inferior
h(pies)	40,1	39,8
Porosidad \emptyset	18	17,5
FR (%)	52	52
Área (acres)	37691	35824
K promedio (md)	450,35	450,35

REALIZADO POR: Bryan Del Pezo.

Las características de los fluidos en el campo varían en cada formación, en el campo Arcan-5 son positivas para la producción de hidrocarburos.

Tabla 3: CARACTERÍSTICA DE LOS FLUIDOS EN LAS ARENAS T Y U.

DATOS	U	T
P_i(psi)	3582	3985
P_b	1450	1455
T(°F)	210	214
API	22	28
GOR(psc/BF)	259	263
β_{oi}(bls/BF)	1,323	1,422
β_{ob}(bls/BF)	1,357	1,485
ρ(g/cc)	0,768	0,7123

REALIZADO POR: Bryan Del Pezo.

1.5 MARCO REFERENCIAL DE LA PROBLEMÁTICA

1.5.1 FUNDAMENTOS DEL BOMBEO HIDRÁULICO TIPO JET

(Cabrera, 2013) Este sistema de bombeo es una alternativa al bombeo hidráulico usado normalmente, debido a que no ocupa partes móviles y la acción de bombeo es realizada por la transferencia de energía entre el fluido motriz usado y los fluidos producidos. El fluido motriz usado deberá entrar en la tobera a una alta presión, cuando esto pase la presión disminuirá por la alta rapidez del fluido motriz.

Las características principales esta la cadencia de partes móviles, también la capacidad de operar a altos volúmenes de fluido, resistir fluidos abrasivos y corrosivos.

1.5.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

(Sebastián, 2018) La bomba hidráulica tipo jet consta de 3 partes principales, las cuales determinan el procedimiento operativo de dicha bomba, estas partes son: tobera, cámara de mezclado o garganta y difusor.

Esta bomba trabaja por transferencia de energía entre dos fluidos, en donde al permitir el ingreso del fluido motriz a una alta presión en la tobera convierte su energía potencial a energía cinética, debido al chorro de alta velocidad. Luego de esto se produce la mezcla del fluido motriz con el fluido producido en la cámara de mezclado, cuando esto ocurre la energía cinética del fluido motriz es cedida al fluido del pozo, esta mezcla avanza hasta la zona de difusor en donde la energía sufrirá otro cambio, el cual se convierte en energía potencial, dicha potencia vence la columna hidrostática en el espacio anular, por lo consiguiente el fluido del pozo es llevado a superficie.

1.5.3 CAVITACIÓN EN EL BOMBEO HIDRÁULICO TIPO JET

(Cruz J. I., 2018) La cavitación se debe al aceleramiento de la producción en el pozo al ingreso a la garganta. Este fenómeno ocurre cuando hay formación de burbujas, debido a que la presión del fluido del pozo es menor a la presión de saturación de dicho fluido, estas burbujas bajan el rendimiento de la bomba, lo que causa una depreciación de la eficiencia, así como problemas por erosión.

1.5.4 FABRICANTES DE BOMBAS HIDRÁULICAS TIPO JET

Hay diversos fabricantes de estas bombas, los cuales se diferencian por su diseño y elaboración, como las combinaciones de cámara de mezclado y Tobera, esto se debe a gran parte por las consideraciones y especificaciones a analizar para cada pozo, ya que no todos tienen las mismas características, los fabricantes más conocidos son: Kobe, National, Claw, OHI, Fluid Packed Pump (FPP), Guiberson.

En la tabla 1.4 se muestran las dimensiones de los diversos fabricantes de bombas jet, Kobe, Claw, Guiberson, Oilwell, Oilmaster y en la tabla 1.5 se presentan las áreas anulares los cuales corresponden al fabricante Guiberson y las áreas anulares National y Kobe se encuentran en las tablas 1.6 y 1.7 correspondientemente.

Tabla 4: ÁREAS DE TOBERAS Y GARGANTA DE BOMBA JET DE LOS DIVERSOS FABRICANTES.

CLAW				Oilwell			
Tobera		Garganta		Tobera		Garganta	
No	Área	No	Área	No	Área	No	Área
1	0,0018	A	0,0046	1	0,0024	A	0,006
2	0,0030	B	0,0072	2	0,0031	B	0,0077
3	0,0038	C	0,0104	3	0,0040	C	0,0100
4	0,0054	D	0,0142	4	0,0052	D	0,0129
5	0,0074	E	0,0187	5	0,0067	E	0,0167
6	0,0094	F	0,0239	6	0,0086	F	0,0215
7	0,0108	G	0,0311	7	0,0095	G	0,0272
8	0,0122	H	0,0376	8	0,0136	H	0,0353
9	0,0148	I	0,0447	9	0,0181	I	0,0456
10	0,0175	J	0,0526	10	0,0229	J	0,0593
11	0,0239	K	0,0654	11	0,0307	K	0,0764
12	0,0311	L	0,0796	12	0,0387	L	0,0989
13	0,0450	M	0,0957	13	0,0498	M	0,1242
14	0,0658	N	0,119	14	0,0642	N	0,1668
15	0,0851	O	0,1445	15	0,0863	O	0,2107
16	0,1251	P	0,1763	16	0,1114	P	0,2783
17	0,1552	Q	0,2154	17	0,1439	Q	0,3594
18	0,1950	R	0,2593	18	0,1858	R	0,4642
19	0,2464	S	0,3127	19	0,2400	S	0,5995
20	0,3119	T	0,376	20	0,3100	T	0,7743
21	0,3850	U	0,4515			U	1,0000
		V	0,5426			V	1,2916
		W	0,652				

National Oilmaster				Kobe				Guiberson			
Tobera		Garganta		Tobera		Garganta		Tobera		Garganta	
Número	Área	Número	Área	Número	Área	Número	Área	Número	Área	Número	Área
1	0,0024	1	0,0064	1	0,0024	1	0,0060	DD	0,00160	0	0,0044
2	0,0031	2	0,0081	2	0,0031	2	0,0077	CC	0,00280	0	0,0071
3	0,0039	3	0,0104	3	0,0040	3	0,0100	BB	0,00380	0	0,0104
4	0,0050	4	0,0131	4	0,0052	4	0,0129	A	0,00550	1	0,0143
5	0,0064	5	0,0167	5	0,0067	5	0,0167	B	0,00950	2	0,0189
6	0,0081	6	0,0212	6	0,0086	6	0,0215	C	0,01230	3	0,0241
7	0,0103	7	0,0271	7	0,0111	7	0,0278	D	0,01770	4	0,0314
8	0,0131	8	0,0346	8	0,0144	8	0,0359	E	0,02410	5	0,0380
9	0,0167	9	0,0441	9	0,0186	9	0,0464	F	0,03140	6	0,0452
10	0,0212	10	0,0562	10	0,0240	10	0,0599	G	0,04520	7	0,0531
11	0,0271	11	0,0310	11	0,0310	11	0,0774	H	0,06610	8	0,0661
12	0,0346	12	0,0910	12	0,0400	12	0,1000	I	0,08550	9	0,0804
13	0,0441	13	0,1159	13	0,0517	13	0,1292	J	0,12570	10	0,0962
14	0,0562	14	0,1476	14	0,0668	14	0,1668	K	0,15900	11	0,1195
15	0,0715	15	0,1879	15	0,0863	15	0,2154	L	0,19630	12	0,1452
16	0,0910	16	0,2392	16	0,1114	16	0,2783	M	0,24630	13	0,1772
17	0,1159	17	0,3046	17	0,1439	17	0,3594	N	0,31170	14	0,2165
18	0,1476	18	0,3878	18	0,1858	18	0,4642	P	0,38480	15	0,2606
19	0,1879	19	0,4938	19	0,2400	19	0,5995			16	0,3127
20	0,2392	20	0,6287	20	0,3100	20	0,7743			17	0,3750
						21	1,0000			18	0,4513
						22	1,2916			19	0,5424
						23	1,6681			20	0,6518
						24	2,1544				

Tobera	Garganta	Relación		Tobera	Garganta	Relación	
		R				R	
N	N-1	0,483X		N	N-1	0,517A-	
N	N	0,380A		N	N	0,400A	
N	N+1	0,299B		N	N+1	0,310B	
N	N+2	0,235C		N	N+2	0,240C	
N	N+3	0,184D		N	N+3	0,186D	
N	N+4	0,145E		N	N+4	0,144E	

FUENTE: Levantamiento artificial, (Melo, 2014)

REALIZADO POR: Bryan Del Pezo.

Tabla 5: RELACIONES DE ÁREAS Y ÁREAS ANULARES DE GARGANTA - GUIBERSON.

Tobera									
DD	Gargantas	000	00						
	R	0,36	0,22						
	As	0,0028	0,0056						
CC	Gargantas	000	00	0	1				
	R	0,64	0,40	0,27	0,20				
	As	0,0016	0,0043	0,0076	0,0115				
BB	Gargantas	00	0	1	2				
	R	0,54	0,37	0,27	0,20				
	As	0,0032	0,0065	0,0105	0,015				
A	Gargantas	0	1	2	3				
	R	0,53	0,39	0,29	0,23				
	As	0,0048	0,0088	0,0133	0,0185				
B	Gargantas	0	1	2	3	4	5	6	
	R	0,92	0,66	0,50	0,40	0,30	0,25	0,21	
	As	0,0009	0,0048	0,0094	0,0145	0,0219	0,0285	0,0357	
C	Gargantas	1	2	3	4	5	6	7	
	R	0,86	0,65	0,51	0,39	0,32	0,27	0,23	
	As	0,002	0,0066	0,0118	0,0191	0,0257	0,0330	0,0408	
D	Gargantas	3	4	5	6	7	8	9	
	R	0,74	0,56	0,46	0,39	0,33	0,27	0,22	
	As	0,0064	0,0137	0,0203	0,0276	0,0354	0,0484	0,0628	
E	Gargantas	4	5	6	7	8	9	10	11
	R	0,77	0,63	0,53	0,45	0,36	0,30	0,25	0,20
	As	0,0074	0,0140	0,0212	0,0290	0,0420	0,0564	0,0722	0,0954
F	Gargantas	6	7	8	9	10	11	12	
	R	0,69	0,59	0,48	0,39	0,33	0,26	0,22	
	As	0,0138	0,0217	0,0346	0,0490	0,0648	0,0880	0,1138	
G	Gargantas	8	9	10	11	12	13	14	
	R	0,68	0,56	0,47	0,38	0,31	0,26	0,21	
	As	0,0208	0,0352	0,0510	0,0742	0,1000	0,1320	0,1712	
H	Gargantas	10	11	12	13	14	15	16	
	R	0,69	0,55	0,45	0,37	0,30	0,25	0,21	
	As	0,0302	0,0534	0,0792	0,1112	0,1504	0,1945	0,2467	
I	Gargantas	11	12	13	14	15	16	17	
	R	0,72	0,59	0,48	0,40	0,33	0,27	0,23	
	As	0,0339	0,0597	0,0917	0,1309	0,1750	0,2272	0,2895	
J	Gargantas	13	14	15	16	17	18	19	
	R	0,71	0,58	0,48	0,40	0,34	0,28	0,23	
	As	0,0515	0,0908	0,1349	0,1871	0,2493	0,3256	0,4167	
K	Gargantas	15	16	17	18	19	20		
	R	0,61	0,51	0,42	0,35	0,29	0,24		
	As	0,1015	0,1537	0,2160	0,2922	0,3833	0,4928		
L	Gargantas	16	17	18	19	20			
	R	0,63	0,52	0,44	0,36	0,30			
	As	0,1164	0,1787	0,2549	0,346	0,4555			
M	Gargantas	17	18	19	20				
	R	0,66	0,55	0,45	0,38				
	As	0,1287	0,2050	0,2961	0,4055				
N	Gargantas	18	19	20					
	R	0,69	0,57	0,48					
	As	0,1395	0,2306	0,3401					
P	Gargantas	19	20						
	R	0,71	0,59						
	As	0,1575	0,267						

FUENTE: Levantamiento artificial, (Melo, 2014)

REALIZADO POR: BRYAN DEL PEZO

Tabla 6: ÁREAS ANULARES TOBERA – GARGANTA DE NATIONAL.

ÁREA ANULAR (GARGANTA - TOBERA), As						
Tobera	X	A	B	C	D	E
1		0,0040	0,0057	0,0080	0,0108	0,0144
2	0,0033	0,0050	0,0073	0,0101	0,0137	0,0183
3	0,0042	0,0065	0,0093	0,0129	0,0175	0,0233
4	0,0054	0,0082	0,0118	0,0164	0,0222	0,0296
5	0,0068	0,0104	0,0150	0,0208	0,0282	0,0377
6	0,0087	0,0133	0,0191	0,0265	0,0360	0,0481
7	0,0111	0,0169	0,0243	0,0338	0,0459	0,0612
8	0,0141	0,0215	0,0310	0,0431	0,0584	0,0779
9	0,0179	0,0274	0,0395	0,0548	0,0743	0,0992
10	0,0229	0,0350	0,0503	0,0698	0,0947	0,1264
11	0,0291	0,0444	0,0639	0,0888	0,1205	0,1608
12	0,0369	0,0564	0,0813	0,1130	0,1533	0,2046
13	0,0469	0,0718	0,1035	0,1438	0,1951	0,2605
14	0,0597	0,0914	0,1317	0,1830	0,2484	0,3316
15	0,0761	0,1164	0,1677	0,2331	0,3163	0,4223
16	0,0969	0,1482	0,2136	0,2968	0,4028	0,5377
17	0,1234	0,1888	0,2720	0,3779	0,5128	
18	0,1571	0,2403	0,3463	0,4812		
19	0,2000	0,3060	0,4409			
20	0,2546	0,3896				

FUENTE: Levantamiento artificial, (Melo, 2014)

REALIZADO POR: Bryan Del Pezo.

Tabla 7: ÁREAS ANULARES TOBERA – GARGANTA DE KOBE.

ÁREA ANULAR (GARGANTA - TOBERA) As						
Tobera	A-	A	B	C	D	E
1		0,0036	0,0053	0,0076	0,0105	0,0143
2	0,0029	0,0046	0,0069	0,0098	0,0136	0,0184
3	0,0037	0,0060	0,0089	0,0127	0,0175	0,0231
4	0,0048	0,0077	0,0115	0,0164	0,0227	0,0308
5	0,0062	0,0100	0,0149	0,0211	0,0293	0,0397
6	0,0080	0,0129	0,0192	0,0273	0,0378	0,0513
7	0,0104	0,0167	0,0248	0,0353	0,0488	0,0663
8	0,0134	0,0216	0,0320	0,0456	0,0631	0,0856
9	0,0174	0,0278	0,0414	0,0589	0,0814	0,1106
10	0,0224	0,0360	0,0534	0,0760	0,1051	0,1428
11	0,0289	0,0464	0,0690	0,0981	0,1358	0,1840
12	0,0374	0,0599	0,0891	0,1268	0,1749	0,2382
13	0,0483	0,0774	0,1151	0,1633	0,2265	0,3076
14	0,0624	0,1001	0,1482	0,2115	0,2926	0,3974
15	0,0806	0,1287	0,1920	0,2731	0,3780	0,5133
16	0,1036	0,1668	0,2479	0,3528	0,4881	0,6629
17	0,1344	0,2155	0,3203	0,4557	0,6304	0,8562
18	0,1735	0,2784	0,4137	0,5885	0,8142	1,1058
19	0,2242	0,3595	0,5343	0,7600	1,0516	1,4282
20	0,2896	0,4643	0,6901	0,9817	1,3583	1,8444

FUENTE: Levantamiento artificial, (Melo, 2014)

REALIZADO POR: Bryan Del Pezo.

CAPITULO II: RESOLUCIÓN

2.1 MÉTODO DE EDDIE E. SMART.

Con este método se podrá determinar la mejor opción de geometría de tobera y cámara de mezclado, el cual se usará en pozos que usarán por primera vez este tipo de recuperación asistida de bombeo hidráulico tipo jet, mejorando así la producción y dependiendo de las características del pozo aumentaremos el tiempo de vida útil.

2.1.1 FACTORES EN LA SELECCIÓN DE LA GEOMETRÍA DE UNA BOMBA POR EL MÉTODO SMART

- Dependiendo de qué tipos de bombas estén usando en superficie sean estas, triplex, quintuplex u horizontales el valor de la presión superficial variará.
- Tanto P_{wh} y P_{wf} dependerán de las condiciones del pozo.
- La producción que se espera alcanzar Q_s se deduce de acuerdo a cada pozo mediante el cálculo de Índice de Productividad.

2.1.2 ASPECTOS TEÓRICOS DEL BOMBEO HIDRÁULICO TIPO JET.

La reducción de la presión del fluido motriz permite el acceso al pozo de los fluidos de yacimientos, una vez ocurre esto los fluidos se mezclan cuando entran al área de la garganta, lo cual hace que se forme un fluido de retorno, que al momento de llegar a la parte final de la cámara de mezclado, este se encuentra a una baja presión y una alta velocidad, cuando ingresa al difusor se convierte de energía cinética a una presión de descarga P_D , lo cual permite que los fluidos de retorno Q_D , lleguen hasta la superficie.

Se debe tener en cuenta dos consideraciones para este método de recuperación.

La primera consideración que debe cumplirse es que la tasa de fluido que se puede bombear a través de la tobera, debe obedecer la siguiente ecuación.

$$Q_N = 832A_N \sqrt{\frac{P_N - P_S}{G_N}} \quad (2.1)$$

La segunda condición se contempla en las curvas de comportamiento adimensional, el cual relaciona la presión de entrada a la tobera P_N , la presión de succión y la presión de descarga con el caudal que fluye a través de la tobera y el caudal producido que entra a la bomba.

$$H = \frac{NUM}{(1+K_N) - NUM} \quad (2.2)$$

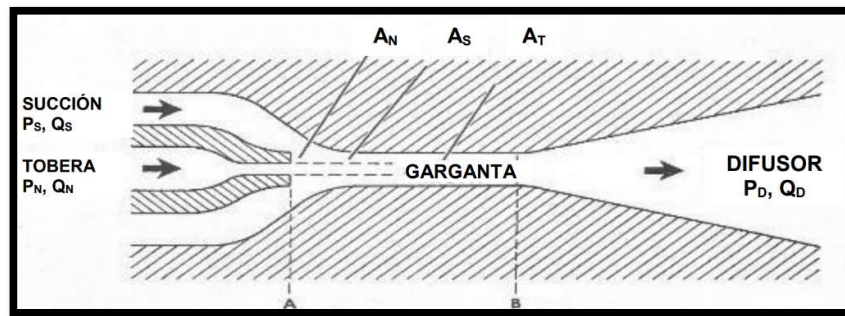
$$\text{NUM} = 2R + (1 - 2R) \left[\frac{M \cdot R}{1 - R} \right]^2 - (1 + K_{TD}) R^2 (1 + M)^2 \quad (2.3)$$

$$R = \frac{A_N}{A_T} \quad (2.4)$$

$$M = \frac{Q_S \cdot G_S}{Q_N \cdot G_N} \quad (2.5)$$

$$H = \frac{P_D - P_S}{P_N - P_D} \quad (2.6)$$

Figura 3: NOMENCLATURA DE LA BOMBA JET.



FUENTE: Levantamiento artificial (Melo, 2014)

Cuando la relación de áreas R es constante, se podrá graficar la relación de presiones H vs el flujo adimensional M , las curvas se generarán si cambiamos el valor de R .

2.2 SELECCIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA BOMBA JET.

Para determinar el comportamiento de la bomba se usan las ecuaciones (2.1) y (2.2), en el cual intervienen las áreas A_N y A_T , para el valor en la ecuación (2.2) el comportamiento adimensional es determinado por el valor de R . La ecuación (2.4) establece una relación entre A_N y A_T , lo cual nos indica que, para elegir la geometría óptima para el procedimiento de recuperación, los valores que podrían modificarse son las áreas.

La ecuación (2.6) representa la relación de las presiones H , y si se despeja dicha ecuación se obtiene:

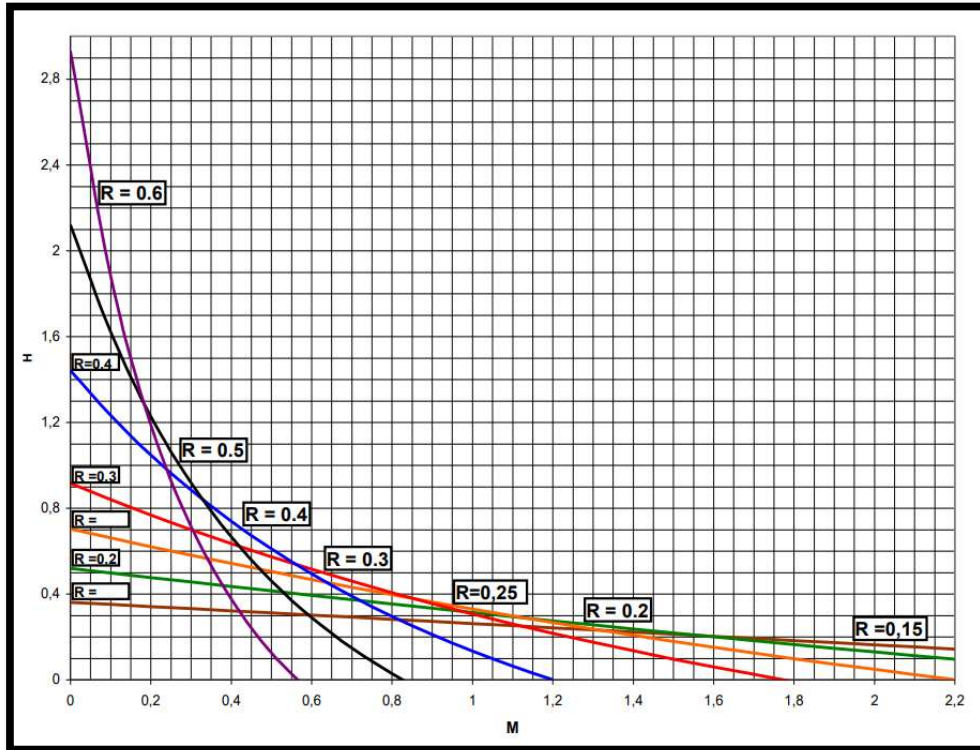
$$P_N = \frac{P_D - P_S}{H} + P_D \quad (2.7)$$

En esta ecuación se deduce que si P_S y P_D son constantes, cuando el valor H se aumenta, la presión P_N se reduce, esto indica que para bajas presiones de operación superficial los requerimientos de potencia son bajos. (Melo, 2014).

2.2.1 LA CURVA DE COMPORTAMIENTO DE DISEÑO.

Esta curva se puede usar para el cálculo de relación de presiones H y la relación que tiene con el flujo adimensional M, que tome en cuenta las especificaciones cada pozo y el IPR de la formación.

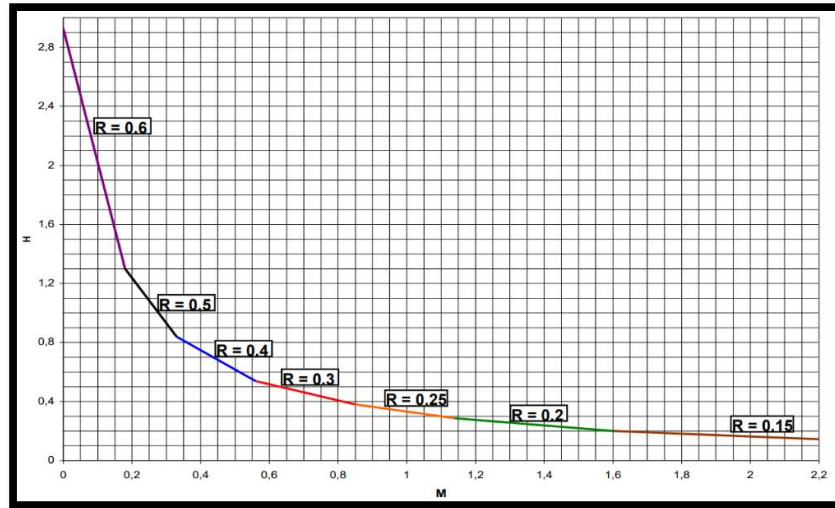
Figura 4: CURVAS H – M DE GUIBERSON.



FUENTE: levantamiento artificial, (Melo, 2014).

La gráfica (2.3) está de manera resumida las curvas donde se dividen por partes los valores de R , con la cual se puede utilizar para calcular las presiones de H y la relación de flujo adimensional M , el cual debe ser acorde a la descripción del pozo y el IPR del pozo analizado. El cálculo de la geometría óptima de la bomba se obtiene a través de la presión superficial deseada, el cual a una mayor presión se obtendrá más eficiencia, el cual reduce la cantidad de fluido motriz usado.

Figura 5: INTERSECCIÓN DE LAS CURVAS DEL COMPORTAMIENTO DE DISEÑO H – M DE GUIBERSON.



FUENTE: levantamiento artificial, (Melo, 2014).

2.2.2 RELACIONES DE ÁREAS ÓPTIMAS

Estos valores se obtienen en los puntos de intersección de la figura 2.3.

Tabla 8: RELACIONES DE ÁREAS ÓPTIMAS.

Relación de áreas, R	Rango de presiones, H
0.60	2.930 – 1.300
0.50	1.300 – 0.839
0.40	0.839 – 0.538
0.30	0.538 – 0.380
0.25	0.380 – 0.286
0.20	0.286 – 0.160
0.15	0.160 -

FUENTE: levantamiento artificial, (Melo, 2014).

2.3 PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA GEOMETRÍA OPTIMA DE LA BOMBA POR EL MÉTODO EDDIE SMART.

- 1) Establecer la presión superficial P_T .
- 2) En este caso se pondrá el flujo adimensional a 1, será usado para el cálculo de pérdidas de presión causadas a fricción inicial.
- 3) Deducir el gradiente de presión del petróleo.

$$G_o = \frac{0.433 \cdot 141,5}{131,5 + \text{°API}} \quad (2.8)$$

- 4) Calcular el gradiente de presión originado, por los gradientes de petróleo y agua.

$$G_s = F_W * G_W + F_o * G_o \quad (2.9)$$

- 5) Calcular el factor volumétrico de formación.

$$B_T \left[1 + 2.8 \left(\frac{GOR}{P_s} \right)^{1,2} \right] F_o + F_W \quad (2.10)$$

- 6) Deducir la tasa de fluido motriz.

$$Q_N = \frac{G_s * Q_s * B_T}{G_N * M} \quad (2.11)$$

- 7) Calcular la pérdida de presión debido a la fricción de la tubería.

$$P_{FN} = \left[\frac{2,02 \times 10^{-6} * L * [(D_1 + D_2) * \mu_o]^{0,21}}{C * G_N^{0,21}} \right] G_N * Q_N^{1,79} \quad (2.12)$$

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

- 8) Calcular la presión del fluido motriz en la garganta P_N .

$$P_N = P_T + G_N * D - P_{FN} \quad (2.13)$$

- 9) Deducir la tasa de fluido de retorno.

$$Q_D = Q_N + Q_S \quad (2.14)$$

- 10) Calcular el gradiente de fluido de retorno.

$$G_D = \frac{G_s * Q_s + G_N * Q_N}{Q_D} \quad (2.15)$$

- 11) Calcular fracción de agua del fluido de retorno.

Cuando el fluido motriz es petróleo.

$$F_{WD} = \frac{Q_s * F_W}{Q_D} \quad (2.16a)$$

Cuando el fluido motriz es agua.

$$F_{WD} = \frac{Q_N + Q_s * F_W}{Q_D} \quad (2.16b)$$

12) Calcular el GLR.

$$GLR = \frac{Q_S * F_O * GOR}{Q_D} \quad (2.17)$$

13) Calcular la viscosidad del fluido de retorno μ_D .

$$\mu_D = F_{WD} + \mu_W + (1 - F_{WD}) * \mu_O \quad (2.18)$$

14) Determinar la presión de descarga de la bomba P_D

Si GLR es menor a $10 \text{ pie}^3/\text{bl}$, determinar P_{FD} .

$$P_D = P_{WH} + G_D * D + P_{FD} \quad (2.19)$$

15) Determinar un nuevo valor de la relación de presiones H.

$$H = \frac{P_D - P_S}{P_N - P_D} \quad (2.20)$$

16) Determinar la relación de áreas óptima R, Basados con el valor de H nuevo.

17) Con la curva de comportamiento de diseño, se determinará un valor para M, con el valor de H anterior. También se puede hallar M con una ecuación.

$$M = \frac{C_3 - \sqrt{C_2 * C_3 + C_3 * C_1 - C_2 * C_1 + \frac{C_4(C_2 - C_3)H}{H+1}}}{C_2 - C_3} \quad (2.21)$$

$$C_1 = 2R \quad (2.22)$$

$$C_2 = \frac{(1-2R)R^2}{(1-R)^2} \quad (2.23)$$

$$C_3 = (1 + K_{TD})R^2 \quad (2.24)$$

$$C_4 = 1 + K_N \quad (2.25)$$

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

$$K_N = 0,03$$

En el caso que exista el fenómeno de cavitación, se deberá usar las curvas de comportamiento (H- M de Guiberson), y para determinar en valor de M nuevo, esta se puede obtener usando la ecuación anterior o por la curva de comportamiento de diseño de Guiberson.

18) Con el nuevo valor de M se debe comparar con la anterior, en caso de que la variación de los resultados de M es del 1% se asume que existe convergencia y procedemos al siguiente paso.

19) Determinar la relación de flujo adimensional en el límite de la cavitación; M_L .

$$M_L = \frac{(1-R)}{R} \sqrt{\frac{P_S}{1,3(P_N - P_S)}} \quad (2.26)$$

- 20) No existirá problema de cavitación si se cumple la condición de $M < M_L$, con esto podemos avanzar al siguiente paso, en caso de no cumplirse la condición es decir $M > M_L$, se requerirá un ajuste para continuar en el siguiente paso.
- 21) Establecer $M = M_L$ y usando el valor de la relación de áreas seleccionada podemos calcular un nuevo valor de la relación de presiones H. Las curvas de comportamiento (H- M de Guiberson) se puede usar también para hallar el valor de H que corresponderá a M_L . Tener en cuenta que el valor de R se debe mantener constante para evitar la cavitación.
- 22) Calcular la presión de operación superficial para prevenir la cavitación.

$$P_T = \frac{P_D - P_S}{H} + P_D - G_N * D + P_{FN} \quad (2.27)$$

- 23) Se debe regresar al paso 5, repitiendo los cálculos previniendo así la cavitación.
- 24) Determinamos el área de la tobera ideal para el manejo de la tasa de fluido motriz, que se calculó en el paso 6.

$$A_N = \frac{Q_N}{832 \sqrt{\frac{P_N - P_S}{G_N}}} \quad (2.28)$$

El Diámetro de la tobera no es exacto si se compara con los comerciales, debido a esto se tomará el más cercano al diámetro obtenido, así como el de la garganta, así se obtendrá las áreas optimas.

2.3.1 PRODUCCIÓN ESPERADA

(Jaramillo & Dávila, 2016) El caudal de producción se obtiene mediante el análisis de la curva IPR, esta es la relación entre el caudal de producción y la presión de fondo (P_{wf}). Es decir, la curva IPR indica el aporte que ha tenido el yacimiento en el tiempo productivo del pozo, este aporte disminuye con el tiempo por diversas situaciones como puede ser el decremento de la presión debido a la producción de fluidos, la baja permeabilidad en los alrededores del pozo, y el incremento de la viscosidad.

Para yacimientos subsaturados la presión inicial es mayor a la presión de burbuja, es decir que inicialmente está en fase líquida en la curva IPR se expresa $P_{wf} > P_b$, y para flujo bifásico $P_{wf} < P_b$. Cuando el P_{wf} es mayor o igual a P_b el comportamiento del IPR es lineal y para P_{wf} menores a P_b se formará una curva.

El caudal producido cuando $P_{wf} > P_b$ se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$q = IP(P_r - P_{wf}) \quad (2.29)$$

El caudal producido cuando $P_{wf} < P_b$ se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$q = IP \left[P_r - P_b + \frac{P_b}{1,8} \left[1 - 0,2 \left(\frac{P_{wf}}{P_b} \right) - 0,8 \left(\frac{P_{wf}}{P_b} \right)^2 \right] \right] \quad (2.30)$$

2.3.2 ELABORACIÓN DE LA CURVA IPR

El valor de índice de productividad se halla entre la diferencia de Presión de reservorio con la presión de fondo fluyente con el caudal actual del pozo.

$$IP = \frac{Q_{actual}}{P_r - p_{wf}} \quad (2.31)$$

$$IP = \frac{560}{1820 - 158} = 2,33 \text{ bl/psi}$$

$$IP = \frac{Q}{P_r - P_{wf}}$$

Para $P_{wf} > P_b$

$$q_o = IP(P_r - P_{wf})$$

$$q_b = IP(P_r - P_b)$$

$$q_b = 2,33 \frac{\text{bbl}}{\text{d} * \text{psi}} (1820 \text{ psi} - 1450 \text{ psi})$$

$$q_b = 862,1 \text{ bbl/d}$$

Para $P_{wf} < P_b$

$$q_o = q_b + \frac{JP_b}{1.8} \left[1 - 0.2 \frac{P_{wf}}{P_b} - 0.8 \left(\frac{P_{wf}}{P_b} \right)^2 \right] \quad (2.32)$$

Para generar la curva IPR usamos los siguientes datos.

Tabla 9: DATOS PARA LA ELABORACIÓN DE LA CURVA IPR.

pwf	qo
1820	0
1750	163,1
1650	396,1
1600	512,6
1450	862,1
1200	1400,0
800	2074,8
600	2326,6
400	2521,2
200	2658,7
0	2739,0

REALIZADO POR: Bryan Del Pezo.

Figura 6: CURVA IPR DEL POZO ARC-2A DEL CAMPO ARCAN-5.



REALIZADO POR: Bryan Del Pezo.

2.4 PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA GEOMETRÍA ÓPTIMA PARA EL POZO ARCAN-5

Tabla 10: DATOS PARA EL PROCEDIMIENTO DEL MÉTODO EDDIE. SMART.

Parámetro	ARCAN-2A	ARCAN-4B	ARCAN-2SB
Profundidad	5800 ft	6000 ft	6320 ft
Longitud de la T.P.	5800 ft	6000 ft	6320 ft
Diámetro exterior de la T.P.	2,375	2,875	3,5
Diámetro interior de la T.P.	1,995	2,441	2,992
Diámetro interior de la tubería de retorno	4,892	4,892	6,336
Presión en la cabeza del pozo	100 lb/pg ²	90 lb/pg ²	80 lb/pg ²
Fluido motriz	Petróleo	Petróleo	Petróleo
Densidad del petróleo	21	20,1	25,2
Viscosidad del agua	0,3	0,3	0,3
Viscosidad del petróleo	2.5	2.5	2.5
Relación gas en solución -petróleo	250 pie ² /bl	260 pie ² /bl	240 pie ² /bl
Fración de agua	0,3	0,35	0,34
Tasa de producción	560	620	558
Presión de fondo	1580 lb/pg ²	1620 lb/pg ²	1800 lb/pg ²
Gw	0,433	0,433	0,433
Q esperado	750	800	830
Pt	2900	3030	3180

REALIZADO POR: Bryan Del Pezo.

La presión superficial que se establecerá es de 3100.

Se asume el valor de flujo adimensional como 1, cabe recalcar este será usado para el cálculo de pérdidas de presión inicial

$$M = 1$$

Deducir el gradiente de presión del petróleo.

$$G_o = \frac{0,433 * 141,5}{131,5 + 21} = 0,4017 \text{ psi/pie}$$

Calcular el gradiente de presión originado, por los gradientes de petróleo y agua.

$$G_s = 0,3 * 0,433 + 0,7 * 0,4017$$

$$G_s = 0,4111 \text{ psi/pie}$$

Calcular el factor volumétrico de formación.

$$B_T = \left[1 + 2,8 \left(\frac{250}{1580} \right)^{1,2} \right] 0,7 + 0,3$$

$$B_T = 1,057 \text{ bl/BF}$$

Deducir la tasa de fluido motriz.

$$G_N = G_o$$

$$Q_N = \frac{0,4111 * 750 * 1,057}{0,4017 * 1}$$

$$Q_N = 811,30 \frac{\text{bl}}{\text{día}}$$

Calcular la pérdida de presión debido a la fricción de la tubería.

$$P_{FN} = \left[\frac{2,02 * 10^{-6} * 5800 * [(1,995) * 2,5]^{0,21}}{31,60 * 0,4017^{0,21}} \right] 0,4017 * 811,30^{1,79}$$

$$P_{FN} = 40,75$$

$$C = (1,995 - 0)(1,995^2 - 0) \left(\frac{1,995}{1,995} \right)^{0,1}$$

$$C = 31,60$$

Calcular la presión del fluido motriz en la garganta P_N .

$$P_N = 2900 + 0,4017 * 5800 - 40,75$$

$$P_N = 5189,11$$

Deducir la tasa de fluido de retorno.

$$Q_D = 811,30 + 750$$

$$Q_D = 1561,3$$

Calcular el gradiente de fluido de retorno.

$$G_D = \frac{0,4111 \cdot 750 + 0,4017 \cdot 811,30}{1561,3}$$

$$G_D = 0,4062$$

Calcular fracción de agua del fluido de retorno.

Se considerará como fluido motriz el petróleo.

$$F_{WD} = \frac{750 \cdot 0,3}{1561,3}$$

$$F_{WD} = 0,1441$$

Calcular el GLR.

$$GLR = \frac{750 \cdot 0,7 \cdot 250}{1561,3} = 84,06$$

Calcular la viscosidad del fluido de retorno μ_D .

$$\mu_D = 0,1441 \cdot 0,3 + (1 - 0,1441) \cdot 2,5$$

$$\mu_D = 2,1829$$

Determinar la presión de descarga de la bomba P_D

Si GLR es menor a $10 \text{ pie}^3/\text{bl}$, determinar P_{FD} .

$$P_{FD} = \left[\frac{2,02 \cdot 10^{-6} \cdot 5800 \cdot [(4,892 + 2,375) \cdot 2,1829]^{0,21}}{899,95 \cdot 0,4062^{0,21}} \right] 0,4062 \cdot 1561,3^{1,79}$$

$$P_{FD} = 5,94 \text{ psi}$$

$$C = (4,892 - 2,375)(4,892^2 - 2,375) \left(\frac{4,892}{4,892 - 2,375} \right)^{0,1}$$

$$C = 899,95$$

$$P_D = 100 + 0,4062 \cdot 5800 + 5,94$$

$$P_D = 2461,9 \text{ psi}$$

Determinar un nuevo valor de la relación de presiones H.

$$H = \frac{2461,9 - 1580}{5189,11 - 2461,9} = 0,3234$$

Determinar la relación de áreas óptima R, Basados con el valor de H nuevo.

Según la tabla de relaciones optimas $R = 0,25$

Con la curva de comportamiento de diseño, se determinará un valor para M, con el valor de H anterior. También se puede hallar M con una ecuación.

$$C_1 = 2 * 0,25$$

$$C_1 = 0,50$$

$$C_2 = \frac{(1 - 2 * 0,25) 0,25^2}{(1 - 0,25)^2}$$

$$C_2 = 0,0556$$

$$C_3 = (1 + 0,2) 0,25^2$$

$$C_3 = 0,075$$

$$C_4 = 1 + 0,03$$

$$C_4 = 1,03$$

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

$$K_N = 0,03$$

$$M = \frac{0,075 - \sqrt{0,0556 * 0,075 + 0,075 * 0,5 - 0,0556 * 0,5 + \frac{1,03(0,0556 - 0,075)0,3234}{0,3234 + 1}}}{0,0556 - 0,075}$$

$$M = 1,020$$

En el caso que exista el fenómeno de cavitación, se deberá usar las curvas de comportamiento (H- M de Guiberson), y para determinar en valor de M nuevo, esta se puede obtener usando la ecuación anterior o por la curva de comportamiento de diseño de Guiberson.

Con el nuevo valor de M se debe comparar con la anterior, en caso de que la variación de los resultados de M es menor del 1% se asume que existe convergencia y procedemos al siguiente paso.

$$\%ERROR = \frac{M_{calculado} - M_{asumido}}{M_{asumido}} * 100$$

$$\%ERROR = \frac{1,020 - 1}{1} * 100$$

$$\%ERROR = 2$$

El porcentaje de error es del 6,24% por lo que se procede a calcular desde el paso 6 con los siguientes datos.

$$G_o = 0,4017 \text{ psi/pie}$$

$$G_s = 0,4111 \text{ psi/pie}$$

$$B_T = 1,057 \text{ bl/BF}$$

Deducir la tasa de fluido motriz.

$$G_N = G_o$$

$$Q_N = \frac{0,4111 * 750 * 1,057}{0,4017 * 1,02}$$

$$Q_N = 795,39 \frac{\text{bl}}{\text{día}}$$

Calcular la pérdida de presión debido a la fricción de la tubería.

$$C = (1,995 - 0)(1,995^2 - 0) \left(\frac{1,995}{1,995 - 0} \right)^{0,1}$$

$$C = 31,60$$

$$P_{FN} = \left[\frac{2,02 \times 10^{-6} * 5800 * [(1,995 + 0) * 2,5]^{0,21}}{31,60 * 0,4017^{0,21}} \right] 0,4017 * 763,46^{1,79}$$

$$P_{FN} = 39,33$$

Calcular la presión del fluido motriz en la garganta P_N .

$$P_N = 2900 + 0,4017 * 5800 - 39,33$$

$$P_N = 5193,31 \text{ psi}$$

Deducir la tasa de fluido de retorno.

$$Q_D = 795,39 + 750$$

$$Q_D = 1545,39$$

Calcular el gradiente de fluido de retorno.

$$G_D = \frac{0,4111 \cdot 750 + 0,4017 \cdot 795,39}{1545,39}$$

$$G_D = 0,4062 \frac{psi}{pie}$$

Calcular fracción de agua del fluido de retorno, se considerará como fluido motriz el petróleo.

$$F_{WD} = \frac{750 \cdot 0,3}{1545,39}$$

$$F_{WD} = 0,1455$$

Calcular el GLR.

$$GLR = \frac{750 \cdot 0,7 \cdot 250}{1545,39}$$

$$GLR = 84,93 \frac{pie^3}{bl}$$

Calcular la viscosidad del fluido de retorno μ_D .

$$\mu_D = 0,1455 \cdot 0,3 + (1 - 0,1455) \cdot 2,5$$

$$\mu_D = 2,179$$

Determinar la presión de descarga de la bomba P_D

Si GLR es menor a $10 \text{ pie}^3/\text{bl}$, determinar P_{FD} .

$$P_{FD} = \left[\frac{2,02 \times 10^{-6} \cdot 5800 \cdot [(4,892 + 2,375) \cdot 2,179]^{0,21}}{899,95 \cdot 0,4062^{0,21}} \right] 0,4062 \cdot 1545,39^{1,79}$$

$$P_{FD} = 5,83 \text{ psi}$$

$$C = (4,892 - 2,375)(4,892^2 - 2,375) \left(\frac{4,892}{4,892 - 2,375} \right)^{0,1}$$

$$C = 899,95$$

$$P_D = 100 + 0,4062 \cdot 5800 + 5,83$$

$$P_D = 2461,79 \text{ psi.}$$

Determinar un nuevo valor de la relación de presiones H.

$$H = \frac{2461,79 - 1580}{5190,53 - 2461,79} = 0,3231$$

Determinar la relación de áreas óptima R, Basados con el valor de H nuevo.

Según la tabla de relaciones óptimas

$$R = 0,25$$

Con la curva de comportamiento de diseño, se determinará un valor para M, con el valor de H anterior. También se puede hallar M con una ecuación.

$$C_1 = 2 * 0,25$$

$$C_1 = 0,50$$

$$C_2 = \frac{(1 - 2 * 0,25) 0,25^2}{(1 - 0,25)^2}$$

$$C_2 = 0,0556$$

$$C_3 = (1 + 0,2) 0,25^2$$

$$C_3 = 0,075$$

$$C_4 = 1 + 0,03$$

$$C_4 = 1,03$$

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

$$K_N = 0,03$$

$$M = \frac{0,075 - \sqrt{0,0556 * 0,075 + 0,075 * 0,5 - 0,0556 * 0,5 + \frac{1,03(0,0556 - 0,075)0,3231}{0,3231 + 1}}}{0,0556 - 0,075}$$

$$M = 1,0215$$

Con el nuevo valor de M se debe comparar con la anterior, en caso de que la variación de los resultados de M es menor del 1% se asume que existe convergencia y procedemos al siguiente paso.

$$\%ERROR = \frac{M_{calculado} - M_{asumido}}{M_{asumido}} * 100$$

$$\%ERROR = \frac{1,0215 - 1,02}{1,02} * 100$$

$$\%ERROR = 0,147$$

Determinar la relación de flujo adimensional en el límite de la cavitación; M_L .

$$M_L = \frac{(1-0,25)}{0,25} \sqrt{\frac{1580}{1,3(5190,53-1580)}}$$

$$M_L = 1,74$$

No existirá problema de cavitación si se cumple la condición de $M < M_L$.

$$1,0215 < 1,74$$

Determinamos el área de la tobera ideal para el manejo de la tasa de fluido motriz, que se calculó en el paso 6.

$$A_N = \frac{795,39}{832 \sqrt{\frac{5190,53}{0,4017}}}$$

$$A_N = 0,01 \text{ pulg}^2$$

Área de la garganta

$$A_T = \frac{A_N}{R}$$

$$A_T = \frac{0,01}{0,25}$$

$$A_T = 0,04 \text{ pulg}^2$$

Cálculo de la potencia empleada en la bomba de superficie

$$HP_{Triplex} = \frac{1,7 \cdot 10^{-5} \cdot P_{iny} \cdot Q_n}{0,9}$$

$$HP_{Triplex} = \frac{1,7 \cdot 10^{-5} \cdot 2900 \cdot 795,39}{0,9}$$

$$HP_{Triplex} = 43,56 \text{ hp}$$

Cálculo de la potencia empleada en la bomba de fondo

$$HP_{pj} = 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta P \cdot Q_D$$

$$\Delta P = P_D - P_s$$

$$HP_{pj} = 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot (2461,79 - 1580) \cdot 1545,39$$

$$HP_{pj} = 23,17$$

Según el resultado la bomba tipo jet requerida en el pozo STA-29 el cual manejará una presión superficial de 2900 psi y tendrá una producción de $750 \frac{bl}{día}$, deberá constar con un área en la tobera de $0,01 \text{ pulg}^2$ y con un área de $0,04 \text{ pulg}^2$ en la garganta, con estos datos el valor de relación entre la tobera y garganta será de 0,25, también el fluido motriz a inyectar deberá ser de $795,39 \frac{bl}{día}$, y las potencias de las bombas será de 43,56 hp en superficie, y en el fondo es de $HP_{pj} = 23,17$.

Las bombas tipo jet tienen las áreas de la tobera y garganta preestablecidas comercialmente, por esta razón se elegirá el más cercano a los resultados obtenidos anteriormente, de acuerdo a los datos de cada fabricante.

2.4.1 SELECCIÓN DE GEOMETRÍAS IDEALES ESCOGIDAS POR LOS DIVERSOS FABRICANTES POR EL MÉTODO SMART PARA EL POZO ARCAN-2A.

Tabla 11: CON LAS DIFERENTES COMBINACIONES DE TOBERA Y GARGANTA POR CADA FABRICANTE PARA EL POZO ARCAN-2A.

KOBE					CLAW					GUIBERSON				
TOBERA		GARGANTA		R	TOBERA		GARGANTA		R	TOBERA		GARGANTA		R
No.	AREA	No.	AREA		No.	AREA	No.	AREA		No.	AREA	No.	AREA	
7	0,0111	9	0,0464	0,239	7	0,0108	I	0,0447	0,242	C	0,0123	6	0,0452	0,272
		10	0,0599	0,185			J	0,0526	0,205			7	0,0531	0,231
8	0,0144	9	0,0464	0,31	8	0,0122	I	0,0447	0,273	D	0,0177	6	0,0452	0,392
		10	0,0599	0,24			J	0,0526	0,232			7	0,0531	0,333

OILWELL					OILMASTER				
TOBERA		GARGANTA		R	TOBERA		GARGANTA		R
No.	AREA	No.	AREA		No.	AREA	No.	AREA	
8	0,0136	I	0,0456	0,298	7	0,0103	9	0,0441	0,234
		J	0,0593	0,229			10	0,0562	0,183
9	0,0181	I	0,0456	0,397	8	0,0131	9	0,0441	0,297
		J	0,0593	0,305			10	0,0562	0,233

REALIZADO POR: Bryan Del Pezo.

Una vez señaladas las geometrías ideales las cuales, satisficieron la relación de tobera y garganta se elegirá una para demostrar la eficiencia de una buena selección de geometría, en este caso elegiremos al fabricante Guiberson C-6.

Tasa de fluido motriz

$$\gamma = \frac{141,5}{131,5+AP}$$

$$\gamma = \frac{141,5}{131,5+21}$$

$$\gamma = 0,9278$$

$$Q_N = 1214,5 A_N \sqrt{\frac{P_N - P_S}{\gamma}}$$

$$Q_N = 1214,5 * 0,0123 \sqrt{\frac{5193,31 - 1580}{0,9278}}$$

$$Q_N = 932,24 \frac{bl}{día}$$

Tasa de fluido de retorno.

$$Q_D = Q_N + Q_S$$

$$Q_D = 932,24 + 750$$

$$Q_D = 1682,24 \frac{bl}{día}$$

$$M = \frac{Q_S}{Q_N}$$

$$M = \frac{750}{932,24}$$

$$M = 0,8045$$

Eficiencia de la bomba

$$E = M * H$$

$$E = 0,8045 * 0,3231$$

$$E = 25,99\%$$

Potencia bomba de fondo

$$\Delta P = P_D * P_{wf}$$

$$HP_{pj} = 1,7 * 10^{-5} * \Delta P * Q_D$$

$$HP_{pj} = 1,7 * 10^{-5} * (2461,79 - 1580) * 1682,24$$

$$HP_{pj} = 25,21 \text{ hp}$$

Potencia de bomba de superficie

$$HP_{Triplex} = \frac{1,7 * 10^{-5} * P_{iny} * Q_n}{0,9}$$

$$HP_{Triplex} = \frac{1,7 * 10^{-5} * 2900 * 932,24}{0,9}$$

$$HP_{Triplex} = 51,06 \text{ hp.}$$

DESARROLLO PARA EL POZO ARCAN-4B

Resultados del pozo Arcan-4B mediante el procedimiento de Eddie Smart, para el cálculo de áreas óptimas de tobera y garganta.

Tabla 12: RESUMEN DE RESULTADOS DEL POZO ARCAN-4B DEL CAMPO ARCAN-5.

Resultados	Primer resultado	Segundo resultado
M	1	1,0199
$G_W(Psi/pie)$	0,4333	0,433
$G_o(Psi/pie)$	0,4040	0,404
$G_S(Psi/pie)$	0,4142	0,4142
B_T	1,2025	1,2025
$Q_N(bl/día)$	986,29	967,04
C	86,6600	86,6600
$P_{FN}(psi)$	22,85	22,06
$P_N(psi)$	5431,15	5431,94
$Q_D(bl/día)$	1786,29	1767,04
$G_D(psi/día)$	0,4086	0,4086
F_{WD}	0,1567	0,1584
$GLR(pie^3/día)$	75,6876	76,5125
$\mu_D(cp)$	2,1551	2,1515
C	540,8812	540,8812
$P_{FD}(psi)$	10,2772	20,4422
$P_D(psi)$	2551,8823	2562,04
H	0,3236	0,3281
R	0,25	0,25
C_1	0,5	0,5
C_2	0,0556	0,0556
C_3	0,075	0,075
C_4	1,03	1,03
M_{CAL}	1,0199	1,019983
% ERROR	1,99	$2,94 \cdot 10^{-3}$

REALIZADO POR: Bryan Del Pezo.

En la segunda iteración el error es menor al 1% por ende se avanza a los siguientes pasos:

La relación de flujo adimensional en el límite de la cavitación; M_L .

$$M_L = \frac{(1-0,25)}{0,25} \sqrt{\frac{1620}{1,3(5431,94-1620)}}$$

$$M_L = 1,7153$$

No existirá problema de cavitación si se cumple la condición de $M < M_L$.

$$1,019983 < 1,7153$$

Determinamos el área de la tobera ideal para el manejo de la tasa de fluido motriz.

$$A_N = \frac{967,04}{832 \sqrt{\frac{5431,94-1620}{0,404}}}$$

$$A_N = 0,01196 \text{ pulg}^2$$

Área de la garganta

$$A_T = \frac{A_N}{R}$$

$$A_T = \frac{0,01196}{0,25}$$

$$A_T = 0,04786 \text{ pulg}^2$$

Cálculo de la potencia empleada en la bomba de superficie

$$HP_{Triplex} = \frac{1,7 \cdot 10^{-5} \cdot 3030 \cdot 967,04}{0,9}$$

$$HP_{Triplex} = 55,34 \text{ hp}$$

Cálculo de la potencia empleada en la bomba de fondo.

$$HP_{pj} = 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot (2562,04 - 1620) \cdot 1767,04$$

$$HP_{pj} = 28,29$$

Con los datos obtenidos se verificará la mejor opción entre los fabricantes que satisfagan, el manejo de presión superficial y con el cual se evite la cavitación así también que se pueda obtener el caudal de producción propuesto.

2.4.2 SELECCIÓN DE GEOMETRÍAS IDEALES ESCOGIDAS POR LOS DIVERSOS FABRICANTES POR EL MÉTODO SMART PARA EL POZO ARCAN-4B.

Tabla 13: CON LAS DIFERENTES COMBINACIONES DE TOBERA Y GARGANTA POR CADA FABRICANTE PARA EL POZO ARCAN-4B.

KOBE					CLAW					GUIBERSON				
TOBERA		GARGANTA		R	TOBERA		GARGANTA		R	TOBERA		GARGANTA		R
No.	AREA	No.	AREA		No.	AREA	No.	AREA		No.	AREA	No.	AREA	
8	0,0144	10	0,0599	0,2404	8	0,0122	J	0,0526	0,232	C	0,0123	7	0,0531	0,231
		11	0,0774	0,1860			K	0,0654	0,186			8	0,0661	0,186
9	0,0186	10	0,0599	0,3105	9	0,0148	J	0,0526	0,281	D	0,0177	7	0,0531	0,333
		11	0,0774	0,2403			K	0,0654	0,226			8	0,0661	0,267

OILWELL					OILMASTER				
TOBERA		GARGANTA		R	TOBERA		GARGANTA		R
No.	AREA	No.	AREA		No.	AREA	No.	AREA	
8	0,0136	J		0,0593	8	0,0131	10	0,0562	0,233
		K		0,0764			0,178	11	0,0715
9	0,0181	J		0,0593	9	0,0167	10	0,0562	0,297
		K		0,0764			0,237	11	0,0715

REALIZADO POR: Bryan Del Pezo.

DESARROLLO PARA EL POZO ARCAN-2SB

Resultados del pozo Arcan-2SB mediante el procedimiento de Eddie Smart, para el cálculo de áreas óptimas de tobera y garganta.

Tabla 14: RESUMEN DE RESULTADOS DEL POZO ARCAN-2SB.

Resultados	Primer resultado	Segundo resultado
M	1	1,0193
$G_W(\text{Psi}/\text{pie})$	0,4333	0,433
$G_o(\text{Psi}/\text{pie})$	0,3910	0,3910
$G_S(\text{Psi}/\text{pie})$	0,4053	0,4053
B_T	1,1647	1,1647
$Q_N(\text{bl}/\text{día})$	1002,056	983,08
C	239,77	239,77
$P_{FN}(\text{psi})$	9,10	8,797
$P_N(\text{psi})$	5642,02	5642,32
$Q_D(\text{bl}/\text{día})$	1832,06	1813,08
$G_D(\text{psi}/\text{día})$	0,3974	0,3075
F_{WD}	0,1540	0,1556
$GLR(\text{pie}^3/\text{día})$	71,762	72,51
$\mu_D(\text{cp})$	2,1612	2,1576
C	2481,81	2481,81
$P_{FD}(\text{psi})$	3,2659	32,06
$P_D(\text{psi})$	2594,83	2595,41
H	0,26	0,2611
R	0,15	0,15
C_1	0,3	0,3
C_2	0,02179	0,02179
C_3	0,027	0,027
C_4	1,03	1,03
M_{CAL}	1,0193	1,0093
$\%ERROR$	1,93	0,98

REALIZADO POR: Bryan Del Pezo.

En la segunda iteración el error es menor al 1% por ende se avanza a los siguientes pasos:

La relación de flujo adimensional en el límite de la cavitación; M_L .

$$M_L = \frac{(1-0,25)}{0,25} \sqrt{\frac{1800}{1,3(5462,32-1800)}}$$

$$M_L = 1,045$$

No existirá problema de cavitación si se cumple la condición de $M < M_L$.

$$1,019983 < 1,0452$$

Determinamos el área de la tobera ideal para el manejo de la tasa de fluido motriz.

$$A_N = \frac{983,08}{832 \sqrt{\frac{5642,32-18}{0,391}}}$$

$$A_N = 0,0119 \text{ pulg}^2$$

Área de la garganta

$$A_T = \frac{A_N}{R}$$

$$A_T = \frac{0,0119}{0,15}$$

$$A_T = 0,07946 \text{ pulg}^2$$

Cálculo de la potencia empleada en la bomba de superficie

$$HP_{Triplex} = \frac{1,7 * 10^{-5} * 3180 * 983,08}{0,9}$$

$$HP_{Triplex} = 59,05 \text{ hp}$$

Cálculo de la potencia empleada en la bomba de fondo.

$$HP_{pj} = 1,7 * 10^{-5} * (2395,41 - 800) * 1813,08$$

$$HP_{pj} = 24,52$$

Con los datos obtenidos se verificará la mejor opción entre los fabricantes que satisfagan, el manejo de presión superficial y con el cual se evite la cavitación así también que se pueda obtener el caudal de producción propuesto.

2.4.3 SELECCIÓN DE GEOMETRÍAS IDEALES ESCOGIDAS POR LOS DIVERSOS FABRICANTES POR EL MÉTODO SMART PARA EL POZO ARCAN-2SB.

Tabla 15: CON LAS DIFERENTES COMBINACIONES DE TOBERA Y GARGANTA POR CADA FABRICANTE PARA EL POZO ARCAN-2SB.

KOBE					CLAW					GUIBERSON				
TOBERA		GARGANTA		R	TOBERA		GARGANTA		R	TOBERA		GARGANTA		R
No.	AREA	No.	AREA		No.	AREA	No.	AREA		No.	AREA	No.	AREA	
8	0,0144	12	0,1000	0,144	8	0,0122	L	0,0796	0,1532	C	0,0123	9	0,0804	0,1529
		13	0,1242	0,1159			M	0,0957	0,1274			10	0,0962	0,1278
9	0,0186	12	0,1000	0,186	9	0,0148	L	0,0796	0,1859	D	0,0177	9	0,0804	0,2201
		13	0,1242	0,1497			M	0,0957	0,1546			10	0,0962	0,1839

OILWELL					OILMASTER				
TOBERA		GARGANTA		R	TOBERA		GARGANTA		R
No.	AREA	No.	AREA		No.	AREA	No.	AREA	
8	0,0136	L	0,0989	0,1375	8	0,0131	12	0,091	0,1439
		M	0,1242	0,1095			13	0,1159	0,1130
9	0,0181	L	0,0989	0,1830	9	0,0167	12	0,091	0,1835
		M	0,1242	0,1457			13	0,1159	0,144

REALIZADO POR: Bryan Del Pezo.

CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 RESULTADOS DE GEOMETRIAS DE BOMBAS IDEALES DE CADA FABRICANTE EN LOS POZOS ARCAN-2A, ARCAN-4B Y ARCAN-2SB

Tabla 16: RESULTADOS DE GEOMETRIAS DE BOMBAS IDEALES DE CADA FABRICANTE PARA EL POZO ARCAN-2A.

	BOMBA	AN	AT	R	
KOBE	8-A		0,0144	0,0464	0,31
CLAW	8-I		0,0122	0,0447	0,273
GUIBERSON	C-6		0,0123	0,452	0,272
OILWELL	8-I		0,0136	0,0456	0,298
OILMASTER	8-A		0,0131	0,0441	0,297

REALIZADO POR: Bryan Del Pezo.

Tabla 17: SELECCIÓN DE LA MEJOR GEOMETRÍA DE BOMBA BASANDOSE EN LA EFICIENCIA Y EL GASTO DE FLUIDO MOTRIZ PARA EL POZO ARCAN-2A.

	BOMBA	QN (BFPD)	QD (BFPD)	QS(BFPD)	Eficiencia%	Hppj	Hptriplex
KOBE	8-A	1091,4	1841,4	750	22,26	27,64	59,78
CLAW	8-I	924,66	1674,66	750	26,23	25,22	50,65
GUIBERSON	C-6	932,24	1682,24	750	25,99	25,21	51,06
OILWELL	8-I	1030,77	1780,77	750	23,56	26,69	56,46
OILMASTER	8-A	992,87	1742,87	750	24,43	26,12	54,32

REALIZADO POR: Bryan Del Pezo.

Una vez señaladas las geometrías ideales las cuales, satisficieron la relación de tobera y garganta se elegirá una el cual sea la mejor opción para la producción.

Tabla 18: RESULTADOS DE GEOMETRIAS DE BOMBAS IDEALES DE CADA FABRICANTE PARA EL POZO ARCAN-4B.

	BOMBA	AN	AT	R
KOBE	9-B	0,0186	0,0599	0,311
CLAW	9-J	0,0148	0,0526	0,281
GUIBERSON	D-8	0,0177	0,0661	0,267
OILWELL	9-J	0,0181	0,0593	0,305
OILMASTER	9-X	0,0167	0,0562	0,297

REALIZADO POR: Bryan Del Pezo.

Tabla 19: SELECCIÓN DE LA MEJOR GEOMETRÍA DE BOMBA BASANDOSE EN LA EFICIENCIA Y EL GASTO DE FLUIDO MOTRIZ PARA EL POZO ARCAN-4B.

	BOMBA	QN (BFPD)	QD (BFPD)	QS(BFPD)	Eficiencia%	Hppj	Hptriplex
KOBE	9-B	1433,69	2243,68	800	18,30	35,93	82,05
CLAW	9-J	1148,92	1948,92	800	22,83	31,21	65,75
GUIBERSON	D-8	1373,83	2173,83	800	19,11	34,81	78,62
OILWELL	9-J	1405,10	2205,10	800	18,67	35,31	80,42
OILMASTER	9-X	1296,42	2096,42	800	20,20	33,57	33,57

REALIZADO POR: Bryan Del Pezo.

Una vez señaladas las geometrías ideales las cuales, satisficieron la relación de tobera y garganta se elegirá una el cual sea la mejor opción para la producción.

Tabla 20: RESULTADOS DE GEOMETRIAS DE BOMBAS IDEALES DE CADA FABRICANTE PARA EL POZO ARCAN-2SB.

	BOMBA	AN	AT	R
KOBE	9-E	0,0186	0,1000	0,1860
CLAW	8-L	0,0122	0,0796	0,1532
GUIBERSON	C-9	0,0123	0,0804	0,1539
OILWELL	9-L	0,0181	0,0989	0,1830
OILMASTER	9-D	0,0167	0,0910	0,1835

REALIZADO POR: Bryan Del Pezo.

Tabla 21: SELECCIÓN DE LA MEJOR GEOMETRÍA DE BOMBA BASANDOSE EN LA EFICIENCIA Y EL GASTO DE FLUIDO MOTRIZ PARA EL POZO ARCAN-2SB.

	BOMBA	QN (BFPD)	QD (BFPD)	QS(BFPD)	Eficiencia%	Hppj	Hptriplex
KOBE	9-E	1473,66	2303,66	830	14,70	31,14	88,58
CLAW	8-L	966,59	1796,59	830	22,42	24,29	58,06
GUIBERSON	C-9	974,52	1804,52	830	22,23	24,39	58,54
OILWELL	9-L	1434,05	2264,05	830	15,11	30,60	86,14
OILMASTER	9-D	1323,13	2153,13	830	16,38	29,10	79,48

REALIZADO POR: Bryan Del Pezo.

A partir de los datos obtenidos en la tabla 3.7 se presentan los resultados para los diferentes pozos en arcan-5

Tabla 22: RESULTADOS DE LOS DIFERENTES CAMPOS CON LAS BOMBAS TIPO JET SELECCIONADAS POR EL METODO EDDIE SMART.

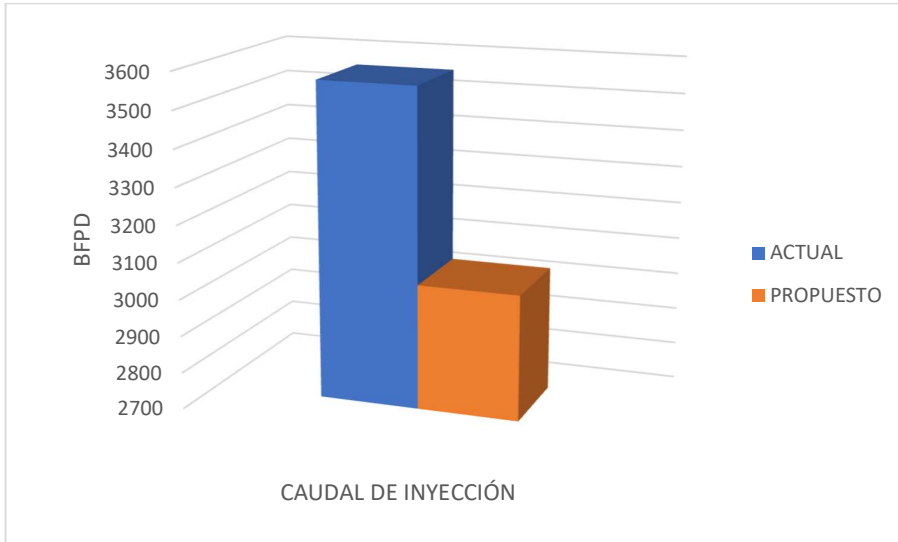
	Actual			Propuesto		
	Q inyección	BPPD	BOMBA JET	Q inyección	BPPD	BOMBA JET
ARCAN-2A	1155	485	9-A	924,66	623	8-I
ARCAN-4B	1433,92	615	9-B	1148,92	668	9-J
ARCAN-2SB	974,52	732	C-9	966,59	792	8-L
TOTAL		1832			2083	

REALIZADO POR: Bryan Del Pezo.

En el estado actual de los pozos seleccionados para el análisis de las geometrías de las bombas, se puede observar un mayor consumo en el caudal de fluido motriz y el caudal producido por día es bajo comparándolo con el establecido por el método E. SMART, el cual con el resultado de las geometrías idóneas de tobera y garganta hay una disminución del fluido motriz usado y el recobro es mayor.

3.2 REDUCCIÓN DEL FLUIDO MOTRIZ USADO EN EL CAMPO ARCAN-5 USANDO EL METODO EDDIE SMART.

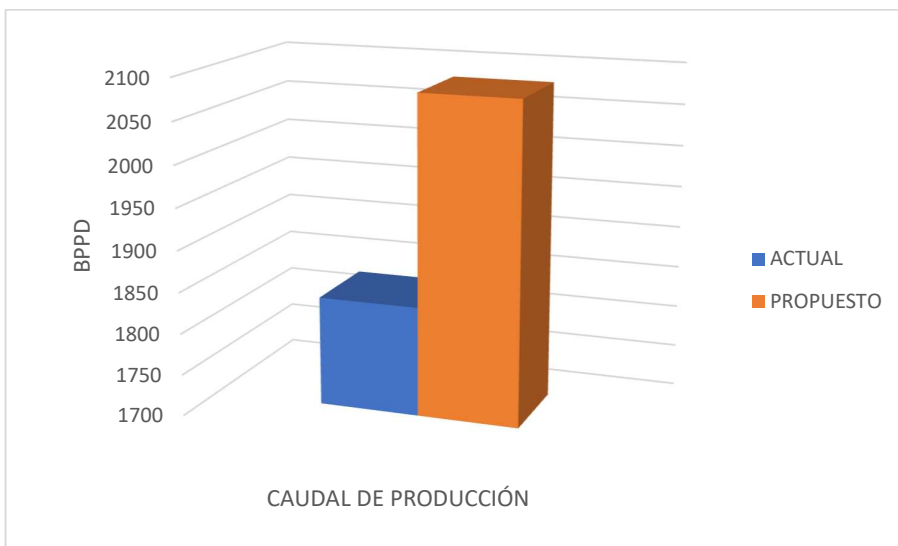
Figura 7: CAUDAL DE INYECCIÓN USADO POR EL MÉTODO DE BOMBEO HIDRÁULICO TIPO JET, ACTUAL Y PROPUESTO.



REALIZADO POR: Bryan Del Pezo.

3.3 INCREMENTO DE PRODUCCIÓN EN EL CAMPO ARCAN-5 USANDO EL METODO EDDIE SMART.

Figura 8: CAUDAL DE PRODUCCIÓN USADO POR EL MÉTODO DE BOMBEO HIDRÁULICO TIPO JET, ACTUAL Y PROPUESTO.



REALIZADO POR: Bryan Del Pezo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- ❖ Los pozos analizados en esta investigación fueron tres, los cuales se observó un funcionamiento bueno, pero no el óptimo, puesto que producían una cantidad de crudo muy bueno pero el manejo del fluido motriz era bien alto y la eficiencia de la bomba jet disminuía.
- ❖ La geometría óptima para cada pozo analizado fue establecida por el método Eddie Smart, siguiendo un conjunto de pasos, a los cuales se establecía un error menor al 1% para que exista convergencia y así evitar la cavitación, siendo este un problema de mucha importancia en el momento de aplicar este método de recuperación, los resultados de R para los pozos; Arcan-2A, Arcan-4B fue de 0,25 y para Arc-2SB fue de 0,15.
- ❖ La mejor opción de la geometría de la bomba se la obtuvo a partir de R, lo cual se comparó con los resultados para cada fabricante de bomba jet, eligiendo la más eficiente para la disminución de fluido motriz usado, siendo estas; para el pozo ARCAN-2A el fabricante CLAW con el modelo 8-I con una eficiencia de 26,23%, para ARCAN- 4B el fabricante CLAW con el modelo 9-J con una eficiencia de 22,83% y para ARCAN-2SB el modelo 8-L con una eficiencia del 22,42%.
- ❖ El método de recuperación asistida de bombeo hidráulico tipo jet, fue optimizado con el método de Eddie Smart, este procedimiento dio como resultado una mejora en la selección de bombas tipo jet, aumentando la eficiencia y el recobro para cada pozo analizado.

RECOMENDACIONES

- ❖ Elegir la geometría óptima usando este método nos puede servir para evitar la cavitación teniendo en cuenta también que la eficiencia de dicha bomba y el menor uso de fluido motriz ayudaría a reducir el costo de cada barril y por ende tener mayor remuneración con el método de bombeo hidráulico tipo jet.
- ❖ Establecer una diferencia menor del 1% del flujo másico adimensional establecido, con el calculado, si es necesario hacer tantas interacciones como sea posible hasta obtener el valor deseado, con esto nos aseguramos que no haya problema de cavitación.
- ❖ Analizar las opciones de la relación de tobera y garganta con respecto a los fabricantes que existen en el mercado, puesto que la eficiencia es una manera más rápida de elegir que bomba queremos usar, pero no tenemos que olvidar el valor económico a los cuales están las diversas bombas.
- ❖ El método de Eddie Smart es un conjunto de cálculos eficaz para la selección de cada bomba, por ende, realizarla antes de adquirir una bomba jet sería lo mejor para cualquier empresa.

BIBLIOGRAFÍA

ALMEIDA, C. P. (ABRIL de 2018). *BIDDIGITAL*. Recuperado el 24 de FEBRERO de 2020, de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19370/1/CD-8753.pdf>

Apolo, V. J., & Díaz, G. X. (2014). *DSPACE.ESPOL*. Recuperado el 09 de DICIEMBRE de 2020, de <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/91612/D-68982.pdf>

Cabrera, J. A. (2013). *OILPRODUCTION*. Recuperado el 17 de DICIEMBRE de 2020, de <http://oilproduction.net/produccion/artificial-lift-systems/bombeo-hidraulico/item/1783-teoria-del-bombeo-hidraulico-tipo-jet>

Cruz, F. B. (03 de Octubre de 2013). *Tesis.ipn*. Recuperado el 09 de Diciembre de 2020, de <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/12302/balcazarcruz.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Cruz, J. I. (Febrero de 2018). *bibdigital*. Recuperado el 19 de Diciembre de 2020, de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19178/1/CD-8562.pdf>

Jaramillo, E. M., & Dávila, S. J. (2016). *Dspace.espol*. Recuperado el 20 de Enero de 2021, de <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/97193/D-CD70187.pdf>

Melo. (2014). *BIBDIGITAL*. Recuperado el 5 de FEBRERO de 2021, de MELO V.,(2014), Levantamiento Artificial, Quito, Ecuador.

Sebastián, M. L. (Febrero de 2018). *bibdigital*. Recuperado el 17 de Diciembre de 2020, de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19183/1/CD-8567.pdf>

VELASCO, F. A., & DÉFAZ, P. A. (Agosto de 2016). *bibdigital*. Recuperado el 4 de FEBRERO de 2021, de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/16748/1/CD-7344.pdf>