



“Aplicación del Cambio de Sistema de Levantamiento Artificial a Bombeo Mecánico en el Campo Sacha”

Emma Mercedes Montoya Sandoval ⁽¹⁾
Ing. Kléber Malavé ⁽²⁾

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (FICT)
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador

⁽¹⁾Ingeniero de Petróleo, e-mail: emmontoy@espol.edu.ec

⁽²⁾Ingeniero de Petróleo, e-mail: kmalave@espol.edu.ec

Resumen

El documento presenta los fundamentos del Sistema de Levantamiento de Bombeo Mecánico, su principio físico, descripción de componentes, clasificación y descripción de las unidades de superficie. Muestra la descripción del campo Sacha, objeto de nuestro estudio, resaltando la clasificación actual de los pozos, su distribución por sistemas de levantamiento y su producción por zonas. Se da a conocer la información y parámetros requeridos para la realización de un adecuado análisis técnico comparativo entre el sistema de levantamiento actual de los pozos del campo Sacha y el de bombeo mecánico propuesto. Se procede a la elaboración de los diseños de las unidades de bombeo mecánico para los pozos aptos para el cambio de sistema. Para esto se utilizó el software “Rodstar” de la compañía “Theta Oilfield Services”. Asimismo, a partir del análisis técnico, se muestra un análisis económico con su respectivo flujo de caja y cálculo de factores financieros con el fin de determinar la rentabilidad del proyecto.

Palabras Claves: Sistema de Levantamiento de Bombeo Mecánico, Sacha, Software Rodstar.

Abstract

The paper presents the basis of Reciprocating Rod Lift System, its physical principles, components description, classification and description of surface units. It displays the description of the Sacha field, object of our study, highlighting the current classification of wells, their distribution by artificial lift systems and production by areas. Disclosed information and parameters required to perform an adequate technical analysis, comparing the current lift system of the wells of Sacha field and proposed Reciprocating Rod Lift System. We proceed to the development of mechanical pumping units designs for wells suitable for system change. This was done using the software "Rodstar" from the Company "Theta Oilfield Services". Furthermore, from technical analysis, economic analysis is shown with its respective cash flow and financial factors calculated in order to determine the profitability of the project.

Keywords: Reciprocating Rod Lift System, Sacha, Rodstar Software.

1. Introducción

En la actualidad, los campos del oriente ecuatoriano producen en su mayoría mediante el sistema de Bombeo Electrosumergible (BES) y en menor proporción por Bombeo Hidráulico (B.H). El sistema BES predomina a pesar de que no siempre se realizan los análisis necesarios para comprobar la eficiencia de su aplicación, considerando que el potencial de producción de los pozos ha declinado

con el tiempo y en consecuencia el sistema BES representa, en muchos casos gastos operacionales innecesarios debido a que los costos de la energía eléctrica requerida son altos y en pozos con bajo potencial no se justifica plenamente dicha inversión.

Además, los altos costos en reparación del equipo eléctrico y de las unidades de “workover” utilizadas, incrementan los gastos operacionales y en

consecuencia disminuye la rentabilidad de los proyectos.

Un detallado análisis técnico y económico del sistema actual de levantamiento artificial instalado en los pozos del campo Sacha versus la propuesta objeto de esta tesis, indicará cual sería el sistema adecuado que debería implementarse en el campo para incrementar la rentabilidad del proyecto considerado.

El análisis técnico comprende el estudio de los parámetros de porcentaje de carga de los elementos del sistema planteado, la potencia requerida y la producción que se obtendría. Por otro lado, el análisis económico consiste en determinar, a partir de la información técnica, los ingresos y egresos que deben tomarse en cuenta en un flujo de caja para calcular los factores financieros que indicarán si nuestro proyecto es rentable o no.

2. Fundamentos de Bombeo Mecánico

El bombeo mecánico también conocido como RRLS, sistema de levantamiento con varillas reciprocantes o “Reciprocating Rod Lift System” por sus siglas en inglés, consiste en poner en comunicación una unidad de bombeo en superficie con una sarta de varillas y ésta con la bomba que se encuentra dentro del pozo, cerca de la zona productora. La unidad de bombeo transmitirá un movimiento vertical reciprocante a la sarta de varillas, que producirá un desplazamiento positivo en la bomba de subsuelo.

2.1 Componentes

Los principales componentes de un sistema de bombeo mecánico son: Equipo de superficie y de subsuelo. El primero está integrado por: Unidad de bombeo, motor y varillón pulido. En el segundo tenemos: Varillas y bomba. Cualquier diseño debe considerar estos cuatro componentes que son interdependientes entre sí.

Las Unidades de Bombeo pueden ser: Balancines, Hidráulicas, Bajo Perfil o Carrera Larga. El principio físico de operación de todas estas es el mismo, presentando características comunes. La diferencia entre ellas radica en las demandas y condiciones de trabajo, como profundidades, producción deseada, propiedades de los fluidos, así como en las limitaciones físicas del campo.

El Motor es aquel que proporciona toda la energía necesaria al sistema de bombeo. Pueden ser eléctricos o de combustión interna. Los primeros se caracterizan

por poseer un mantenimiento e instalación sencilla y económica. Por otra parte los de combustión interna son diseñados para trabajar a Gas Natural. Los costos de combustible para estos últimos son más económicos en comparación a los eléctricos.

El varillón pulido, también conocido como vástago, se encuentra conectado a la cabeza del balancín por medio de un cable de soporte. Permite la comunicación entre la Unidad de Superficie y la sarta de varillas.

Las varillas transfieren el movimiento vertical reciprocante del varillón pulido al pistón de la bomba de subsuelo la cual crea el desplazamiento positivo del fluido. Cuando la bomba opera en la carrera ascendente del pistón, la bola de la válvula fija se levanta permitiendo el ingreso del fluido del yacimiento al barril, permaneciendo cerrada la válvula viajera. En la corrida descendente el pistón en donde se encuentra la viajera desciende a través de la columna de fluido levantada en la carrera ascendente y que se encuentra en la cámara de compresión mientras que la fija permanece cerrada y la viajera se abre para permitir el paso del fluido a la superficie, como se muestra en la Figura 1.

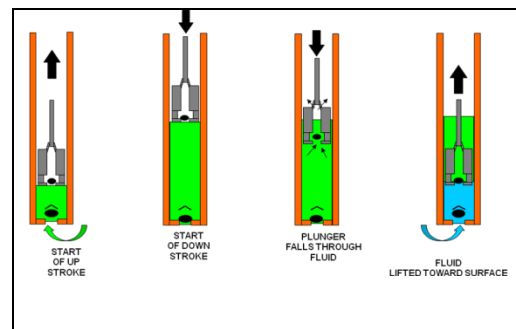


Figura 1. Carrera Ascendente y Descendente

3. Estado Actual del Campo en Estudio

Existen 157 pozos productores en el campo donde se proyecta cambiar del sistema eléctrico e hidráulico a bombeo mecánico en varios de ellos, repartidos en cuatro zonas: Norte 1, Norte 2, Central y Sur.

2.1 Distribución de Sistemas de Levantamiento por Zonas

La Figura 2 muestra la cantidad de pozos distribuidos en las zonas del campo y el tipo de levantamiento aplicado.

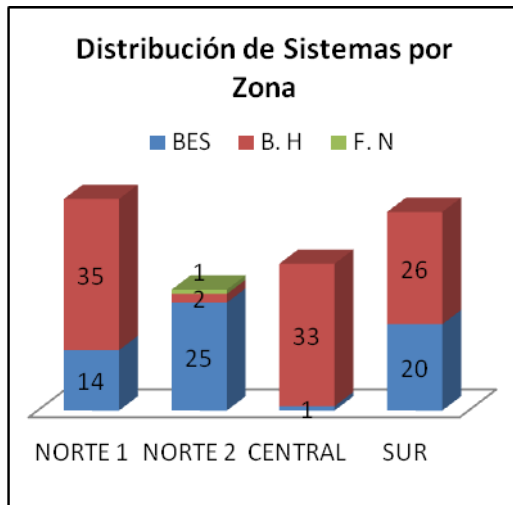


Figura 2. Distribución de Sistemas por Zonas

La cantidad de pozos con bombeo electrosumergible corresponde al 38% del total del campo, a hidráulico el 61% y a flujo natural solamente el 1%, quedando en evidencia que el sistema de levantamiento más utilizado es el hidráulico.

A noviembre de 2010, la siguiente figura muestra la producción del campo por zonas y para cada sistema de levantamiento.

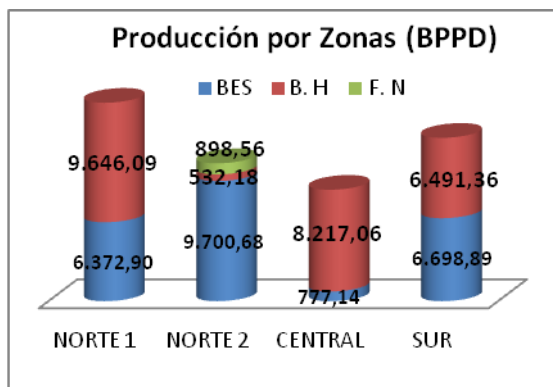


Figura 3. Producción por Zonas

Podemos ver que la producción proveniente de bombeo hidráulico representa el 50% del total, el electrosumergible aporta una producción correspondiente al 48% y el pozo por flujo natural representa un 2% del valor total.

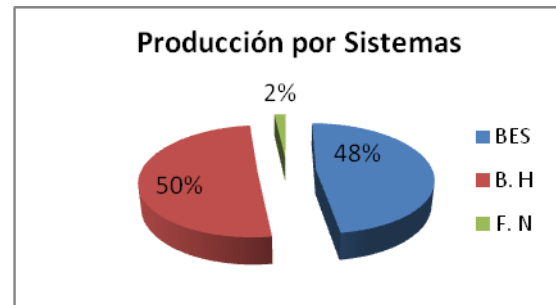


Figura 4. Distribución de Sistemas por Zonas

4. Información y Parámetros Requeridos en el Diseño de Sistemas de Bombeo Mecánico para los Pozos del Campo

4.1 Recolección de Datos

Para realizar el proyecto de optimización del campo se requiere la siguiente información:

- Información del cliente, nombre del pozo y ubicación
- Pruebas de producción de cada uno de los pozos
- Diagramas de Completación

Adicionalmente se deben conocer las características de la locación del pozo para estar al tanto de alguna condición especial como poblaciones cercanas. En nuestro caso no se tienen limitaciones que impidan colocar una unidad de bombeo mecánico de cualquier clase.

4.2 Proceso de Pre-Selección

Consiste en escoger de los 157 pozos del campo a aquellos que se encuentren dentro de los rangos de aplicación del sistema de bombeo mecánico. Para aquello emplearemos el Método de la Curva Tipo.

4.2.1. Método de la Curva Tipo. Radica en analizar la producción y profundidad de cada uno de los pozos del campo, tabulando y graficando dicha información como se muestra en los siguientes tres pasos:

1. Tabular la producción y profundidad de los 157 pozos del campo y graficar para cada uno de ellos Profundidad vs. Caudal.

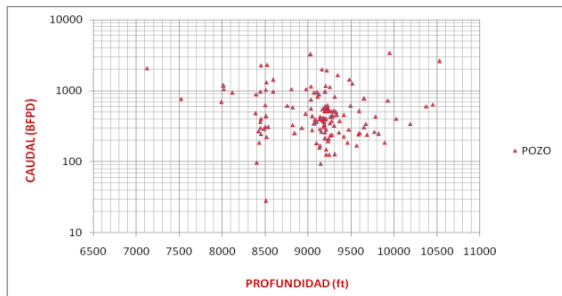


Figura 5. Profundidad vs. Caudal para cada pozo

2. Seleccionar el gráfico de la Curva Tipo para Bombeo Mecánico de Profundidad vs. Caudal tomado del documento “5 Step Selection Process” de Weatherford® Artificial Lift System.

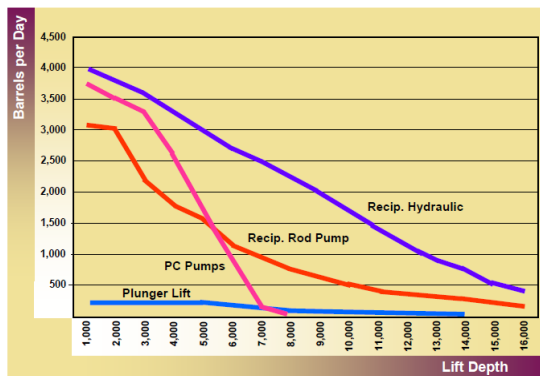


Figura 6. Curva Tipo Profundidad vs. Caudal Máximo

3. Superponer la Curva Tipo del paso 2 en el gráfico del paso 1 en escala semi-logarítmica.

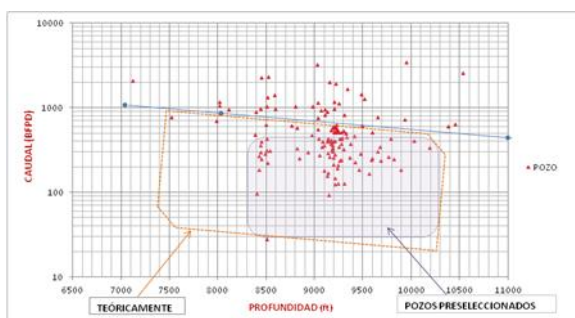


Figura 7. Pozos Pre-Seleccionados

Teóricamente, todos los pozos ubicados por debajo de la curva tipo serían los candidatos preseleccionados para el cambio de sistema a bombeo mecánico. Sin embargo, debemos tener en cuenta que la eficiencia de este sistema aumenta conforme disminuye la tasa de producción y la profundidad. Por esta razón, como

criterio de pre-selección, consideraremos pozos con caudales por debajo de 400 BFPD.

Aplicando el criterio citado se pre-seleccionan 69 pozos para el cambio de sistema a Bombeo Mecánico en el Campo Sacha.

4.3 Definición de Categorías de Pozos (Pozos Tipo)

Los 69 pozos preseleccionados anteriormente son clasificados de acuerdo a sus respectivos y actuales sistemas de levantamiento artificial: BES, B.H Pistón, B.H Jet y B.H con Unidad MTU. En cada sistema los pozos a su vez se clasifican según el intervalo de producción y profundidad, con el fin de obtener categorías (pozos tipo) para elaborar los diseños de sistemas de bombeo mecánico en el software Rodstar y posteriormente realizarles el análisis técnico pertinente.

Los Pozos Tipo obtenidos para cada sistema actual son los siguientes:

- BES:

	BFPD	PROFUNDIDAD (ft)
1	100 – 200	9890
2	200 – 300	8750
3	200 – 300	9308
4	300 – 400	8675
5	300 – 400	9183
6	300 – 400	10189

Tabla 1. Pozos Tipo para BES

- B.H Pistón:

	BFPD	PROFUNDIDAD (ft)
1	100 – 200	9252
2	200 – 300	8483
3	200 – 300	9370
4	300 – 400	8467
5	300 – 400	9324

Tabla 2. Pozos Tipo para B.H Pistón

- B.H Jet:

	BFPD	PROFUNDIDAD (ft)
1	28	8509
2	90 – 100	8774,5
3	100 – 200	8428
4	100 – 200	9294
5	200 – 300	8490
6	200 – 300	9218,5
7	200 – 300	9704
8	300 – 400	8493
9	300 – 400	9208

Tabla 3. Pozos Tipo para B.H Jet

• B.H Unidad MTU:

	BFPD	PROFUNDIDAD (ft)
1	150 - 250	9203
2	264	9769

Tabla 4. Pozos Tipo para B.H MTU

En conclusión, se obtienen 22 categorías o pozos tipos, con las producciones y profundidades indicadas en las tablas anteriores. A continuación, para cada una de estas categorías procederemos a elaborar los diseños de las unidades de bombeo mecánico utilizando el software Rodstar.

4.4 Diseños del Sistema de Bombeo Mecánico para los Pozos Tipo

Se elaboran 22 diseños correspondientes a las 22 categorías seleccionadas. Cada diseño mostrará el sistema integral de bombeo mecánico propuesto. Las características del mismo dependerán del estado mecánico del pozo, de las propiedades del yacimiento y del potencial de producción.

A continuación se explican los pasos que se siguen en el software Rodstar para la obtención de los diseños de las unidades de bombeo mecánico.

1. Ingresar datos de IPR y producción proyectada para calcular la presión de entrada (intake) y el nivel de sumergencia de la bomba para cualquier unidad. El software generará automáticamente las curvas de IPR para el petróleo, agua y fluido total
2. Se seleccionan las características de la sarta de varillas (grados y diámetros), y el tipo de

unidad de bombeo superficial idóneo para el cambio de sistema.

3. Después de la selección, el software calcula y muestra los valores de producción proyectada, nivel de fluido sobre la bomba, torque de la caja reductora, cargas de la caja reductora, varillas y unidad, “strokes” por minuto de la bomba (SPM), mínima longitud requerida de la bomba, potencia del motor y consumo diario de energía; además muestra las cartas dinamométricas y los gráficos de torque de la caja reductora y el IPR para cada diseño propuesto.

Cabe recalcar que la elaboración de un diseño en “Rodstar” es un proceso de prueba y error, pues una vez ingresados todos los datos mencionados se procede a correr el programa para obtener el diseño con los correspondientes valores. Si ocurre que las cargas de la unidad, de la caja reductora o de las varillas son altas o si el nivel de fluido sobre la bomba es bajo, se procede a ingresar nuevos datos como dimensión de unidad de bombeo, grado de varilla o producción deseada, para ajustar los valores que deseamos corregir y obtener así un buen diseño.

Para este proyecto, se diseñan 22 sistemas de bombeo mecánico correspondientes a las 22 categorías o pozos tipo citados anteriormente. Los diseños tienen unidades de superficie Rotaflex, que es la recomendada para estos pozos por los buenos resultados obtenidos, como se demostrará en el Análisis Técnico. Además se efectuaron 22 diseños alternativos considerando unidades de superficie Balancín Convencional Legrand para demostrar la conveniencia y ventajas de utilizar la Rotaflex. Un ejemplo de diseño se muestra a continuación.

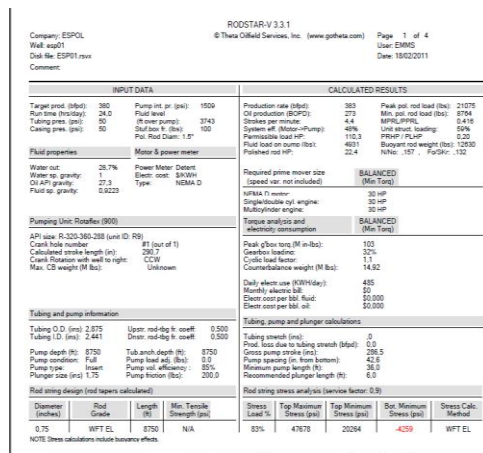


Figura 8. Diseño de Sistema de Bombeo Mecánico en Rodstar

5. Análisis Técnico

La información técnica suministrada por los diseños permite visualizar las ventajas de aplicar el sistema de bombeo mecánico propuesto frente a las otras tecnologías utilizadas actualmente en el campo.

Además hace posible determinar costos de mantenimiento y posibles ingresos, lo cual ayudará a establecer la rentabilidad del proyecto y si es económicamente viable.

Entre los parámetros más importantes para el análisis técnico de los pozos tipo que el software Rodstar calcula, tenemos:

- Porcentajes de cargas de la Estructura, Caja Reductora y Varillas
- Potencia del Motor
- Producción

5.1 Porcentajes de Cargas de la Estructura, Caja Reductora y Varillas

Permiten predecir adecuadamente el comportamiento de los componentes. Si el porcentaje de carga es menor o igual al 85% podemos maximizar el tiempo de vida de cada parte y optimizar el funcionamiento del sistema en general.

A continuación se muestra una comparación de las cargas entre una unidad de bombeo convencional y una de carrera larga (Rotaflex), para todas los Pozos Tipo seleccionados. Los valores en rojo indican sobrecarga o valores muy próximos a la sobrecarga.

POZO	CARGAS (%)					
	BALANCIN CONVENCIONAL			ROTAFLEX		
	Estructura	Caja Reductora	Varillas	Estructura	Caja Reductora	Varillas
ESPOL01	68	74	73	59	32	83
ESPOL02	78	72	87	75	40	76
ESPOL03	88	88	88	80	48	86
ESPOL04	97	91	81	82	48	88
ESPOL05	99	92	84	83	49	89
ESPOL06	70	73	77	60	35	88
ESPOL07	74	66	80	71	39	70
ESPOL08	70	53	70	58	28	79
ESPOL09	85	81	88	55	24	69
ESPOL10	78	74	74	53	26	69
ESPOL11	82	87	93	79	48	84
ESPOL12	71	77	93	57	35	83
ESPOL13	84	111	84	76	63	87
ESPOL14	64	81	84	70	40	70
ESPOL15	72	92	80	79	48	85
ESPOL16	75	73	71	85	38	64
ESPOL17	62	87	82	58	50	88
ESPOL18	64	81	85	60	54	93
ESPOL19	76	89	79	59	40	81
ESPOL20	75	82	83	78	41	82
ESPOL21	69	75	75	66	33	78
ESPOL22	72	86	86	72	51	81
PROMEDIO	76.05	81.14	81.68	68.86	41.36	80.59

Tabla 5. Porcentaje de Cargas Balancín Convencional – Rotaflex

El porcentaje de carga promedio en la estructura en los balancines convencionales es del 76.72%, mientras que en las unidades Rotaflex es del 68.89%, es decir existe una diferencia del 7.83% a favor de la última.

La carga promedio de la caja reductora con unidad convencional es del 80.72%, mientras que para la unidad de carrera larga es del 41.39%. Esto significa que la declinación de carga en la caja reductora es del 39.33% al utilizar Rotaflex, lo cual se traduce en mayor porcentaje de seguridad, es decir, incremento del tiempo de vida de la caja reductora.

La variación de cargas en las varillas entre la unidad convencional y la de carrera larga, es mínima, pero las soportadas la Rotaflex siguen siendo menores. La carga promedio de varillas en balancín convencional es del 81.89%, mientras que con Rotaflex es del 80.61%.

Los resultados anteriores permiten concluir que las cargas de estructuras, cajas reductoras y varillas, generadas por la unidad de carrera larga son menores a las manejadas por la unidad de balancín convencional. Esto significa que con Rotaflex maximizaremos el tiempo de vida de las partes mencionadas y obtendremos en general un mayor rendimiento del sistema de bombeo mecánico.

5.2 Motor de la Unidad de Bombeo en Superficie

Los diseños realizados en Rodstar indican la potencia del motor requerida en los sistemas de bombeo mecánico propuestos. Sin embargo, para poder analizar y comparar estos valores es necesario obtener las potencias de las bombas hidráulicas y de los motores de las electrosumergibles correspondientes a los sistemas actuales del campo.

La potencia de un sistema de bombeo hidráulico puede ser calculada mediante la siguiente ecuación:

$$HP = 1.7 \times 10^{-5} Q_{iny} P_s$$

Donde:

HP = Potencia de bomba, hp

Q_{iny} = Tasa de inyección de fluido motriz, BFPD

P_s = Presión de superficie (Bomba Triplex), psi

Las potencias de los motores de las bombas electrosumergibles de todos los pozos tipo se obtienen de los respectivos diagramas de completación.

Los HP's del motor para cada pozo con su respectivo sistema actual de levantamiento son los siguientes:

POZO TIPO	SISTEMA ACTUAL	MOTOR (HP)
ESPOL 01	BES	100
ESPOL 02	BES	120
ESPOL 03	BES	132
ESPOL 04	BES	100
ESPOL 05	B.H PISTON	62.99
ESPOL 06	B.H JET	95.40
ESPOL 07	B.H JET	106.08
ESPOL 08	B.H JET	94.15
ESPOL 09	B.H PISTON	61.50
ESPOL 10	B.H MTU	125.66
ESPOL 11	B.H JET	138.87
ESPOL 12	B.H JET	90.83
ESPOL 13	B.H PISTON	116.03
ESPOL 14	B.H JET	126.64
ESPOL 15	B.H JET	76.16
ESPOL 16	B.H JET	115.73
ESPOL 17	B.H PISTON	126.63
ESPOL 18	B.H PISTON	131.27
ESPOL 19	B.H JET	108.73
ESPOL 20	B.H MTU	95.68
ESPOL 21	BES	100
ESPOL 22	BES	114

Tabla 6. Potencia del Motor del Sistema Actual para cada Pozo Tipo

La Figura 9 muestra la diferencia existente entre la potencia requerida en los pozos trabajando con el sistema actual y la necesaria para operar con bombeo mecánico convencional, existiendo una reducción a favor del último de 25.59%. La diferencia se vuelve mayor entre el sistema actual y el propuesto con unidad de carrera larga, observando que la misma llega al 60.23%.

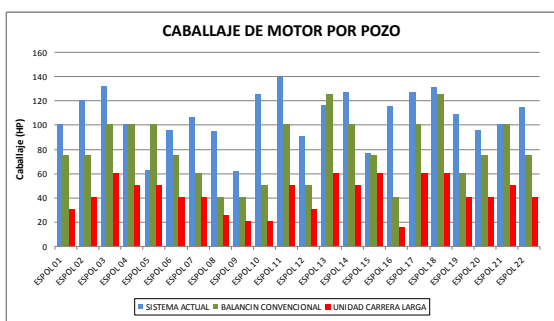


Figura 9. Potencia requerida por Sistema para cada Pozo Tipo

En conclusión, podemos observar que la potencia total requerida en el campo se reduce significativamente al cambiar de sistema. Con Rotaflex se disminuirá el consumo de energía y por lo tanto los costos operacionales.

5.3 Predicción de Producción

El software RODSTAR es un simulador que también predice la producción que se obtendría al aplicar sistema de bombeo mecánico diseñado.

La tabla a continuación compara la producción actual de cada pozo con la que se obtendría al aplicar bombeo mecánico con Balancín y Rotaflex.

POZO TIPO	PRODUCCIÓN (BFPD)			Incremento Máximo de Producción (%)
	SISTEMA ACTUAL	BALANCIN CONVENCIONAL	ROTAFLX	
ESPOL 01	258	379	383	48.45
ESPOL 02	270	318	318	17.78
ESPOL 03	341	586	555	62.76
ESPOL 04	362	525	507	40.06
ESPOL 05	252	527	506	100.79
ESPOL 06	95	350	357	275.79
ESPOL 07	260.17	309	313	20.31
ESPOL 08	152	223	220	44.74
ESPOL 09	166	202	201	21.08
ESPOL 10	203	603	606	198.52
ESPOL 11	365	376	374	2.47
ESPOL 12	185	255	260	40.54
ESPOL 13	374.5	703	702	87.45
ESPOL 14	287	378	377	31.36
ESPOL 15	306	353	544	77.78
ESPOL 16	28	115	117	317.86
ESPOL 17	233.5	444	551	135.97
ESPOL 18	340	571	557	63.82
ESPOL 19	244.5	522	506	106.95
ESPOL 20	264	305	310	17.42
ESPOL 21	340	573	560	64.71
ESPOL 22	186	220	234	25.81
TOTAL	4478.17	8837	9058	102.27

Tabla 7. Producción por Sistema para cada Pozo Tipo

En la Figura 10 se visualiza la diferencia que existiría entre la producción obtenida con los sistemas actuales y la que se podría lograr con bombeo mecánico. A Noviembre del 2010, los pozos candidatos para el cambio de sistema levantamiento producen un total de 4478.17 BFPD; el bombeo mecánico con balancín convencional significaría que la producción incremente a 8837 BFPD, y con Rotaflex se obtendrían 9058 BFPD, representando este último sistema un incremento del 102.27 % de la producción con respecto al valor actual, lo cual significaría un aumento en las ganancias netas y en la rentabilidad del proyecto.

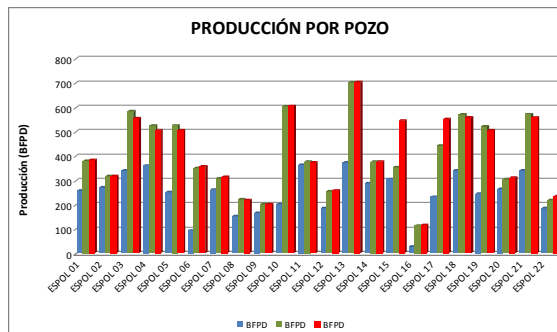


Figura 10. Producción por Sistema para cada Pozo Tipo

De acuerdo a los resultados del anterior análisis técnico, podemos concluir lo siguiente:

- La unidad idónea recomendable para el cambio de sistema es la de carrera larga Rotaflex.
- Las 22 categorías (Pozos Tipo) son buenas opciones para el cambio de sistema.
- Por lo tanto, los 69 pozos productores pre-seleccionados con anterioridad son aptos para aplicar el cambio de sistema a bombeo mecánico.

6. Análisis Económico

La evaluación de este proyecto de inversión permite determinar la conveniencia o no de utilizar recursos destinados a la ejecución del mismo, con el fin de incrementar la producción del campo o reducir gastos operacionales y por lo tanto aumentar su rentabilidad.

En esta etapa, estudiaremos los ingresos por producción, costos de inversión, instalación, renta de equipos y operación. Dentro de estos últimos tenemos gastos por reacondicionamiento, reparación de equipos y consumo de energía.

6.1. Costos de Inversión Inicial e Instalación

El costo de Inversión Inicial se refiere al desembolso requerido en el año cero para llevar adelante el proyecto. Más conocido como valor de entrada que es de \$67,500 para cada Unidad Rotaflex y que incluye arreglos de locación y equipo de subsuelo. Por los 69 pozos recomendados para el cambio de sistema da una cifra total de \$4'657,500.00, mientras que el costo de inversión inicial de los sistemas actuales es de \$3'795,000.00, es decir un aumento del 22,73% al aplicar el cambio de sistema.

El costo de Instalación es aquel valor diario requerido para instalar una unidad y que cubre: mano de obra, asistencia técnica y movilización de los equipos. Para todos los sistemas, incluida Rotaflex, el costo es de \$6,500 y considerando un tiempo de 5 días de instalación tenemos un total de \$32,500.00 por unidad instalada. Para los 69 pozos se necesitan \$2'242,500.00, tanto para el sistema actual como para el propuesto.

6.2. Costos de Renta por Equipos

Son los valores periódicos (anuales) que la operadora deberá cancelar por la renta del equipo durante el tiempo de vida del proyecto (4 años).

La Tabla 5.3 compara los costos de renta que se deberían cancelar anualmente si se tendrían que alquilar los actuales equipos de levantamiento artificial instalados en los 69 pozos seleccionados y el sistema propuesto.

SISTEMA	No. Pozos	Costo de Renta Anual actual (US\$/año)	Costo de Renta Anual ROTAFLEX (US\$/año)
BES	15	\$ 4.106.250,00	\$ -
B.H PISTON	19	\$ 4.993.200,00	\$ -
B.H JET	31	\$ 8.146.800,00	\$ -
B.H MTU	4	\$ 4.555.200,00	\$ -
TOTAL	69	\$ 21.801.450,00	\$17.629.500,00

Tabla 8. Comparación de Costos de Renta Anual entre Sistemas

Podemos apreciar una diferencia de costos a favor de Rotaflex del 19.14%.

6.3. Costos de Reacondicionamiento y de Reparación del Equipo de Subsuelo

Para determinar estos costos es fundamental definir antes los factores estadísticos MTTR y TF.

- El MTTR (Mean Time To Repair), es el promedio de días requeridos para solucionar un determinado problema o una falla del sistema.
- La TF (Tasa de Falla) es el número de fallas ocurridas en el sistema durante un año.

Ambos factores se determinan a partir de los historiales de reacondicionamiento de cada pozo estableciendo la frecuencia de los mismos y el tiempo necesario para solucionar un problema dado.

6.3.1. Costos de Reacondicionamiento. Definidos los factores anteriores, estos costos se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Costo Intervención} = \text{Costo Promedio Unidad WO} \times \text{MTTR} \times \text{TF}$$

6.3.2. Costos de Reparación. Dependen del tipo de falla que se presente en los equipos. Las más comunes son reparación o cambio de bomba de subsuelo y reparación de cable en el caso de BES.

Se encuentra además en función de la Tasa de Falla y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Costo de Reparación} = \Sigma \text{Costos de Reparación del problema} \times \text{TF}$$

El costo referencial de renta por unidad de reacondicionamiento es de \$10,000 diarios, tanto para taladro como para unidad de pulling. Mientras que los costos de las fallas más comunes en los equipos para cada sistema de levantamiento se muestra a continuación.

COSTOS	BES	B.H PISTON	B.H JET	UNIDAD MTU	ROTAFLEX
Reparación de bomba (US\$)	\$ 45.000,00	\$ 3.350,00	\$.350,00	\$ 3.350,00	\$ 7.000,00
Reparación de cable (US\$)	\$ 15.000,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Cambio de bomba (US\$)	\$200.000,00	\$14.000,00	14.000,00	\$14.000,00	\$31.500,00
TOTAL	\$260.000,00	17.350,00	17.350,00	\$17.350,00	\$38.500,00

Tabla 9. Costos de Reparación de Equipos para cada Sistema

Existe una notable diferencia en los gastos de reacondicionamiento y los de reparación entre el sistema actual y el propuesto. Podemos observar que los gastos de “workover” para el sistema actual son de \$4,099,676 anuales, mientras que con Rotaflex se reducen a \$2,487,000, significando una disminución en gastos del 39,34%. Los costos en reparación se reducen de \$4,016,771, con el sistema actual a \$1,595,825, con Rotaflex, es decir, una disminución del 60,27%.

6.4. Costos por Consumo de Energía Eléctrica

El cálculo del consumo de Energía depende de los Kw/h consumidos por el motor de cada sistema. Para esto se emplea la siguiente ecuación:

$$\frac{Kw}{h} = HP \times 0.7457$$

Además depende de los factores MTTR, TF y del costo del kw/h que para este caso se utilizará un valor de US\$ 0,07. Por lo tanto, la ecuación empelada para el cálculo de consumo de energía es:

$$\text{Costo Consumo de Energía} = 0,07 \times \frac{Kw}{h} \times 24 \times (365 - (\text{MTTR} \times \text{TF}))$$

Los costos por consumo de energía con el sistema actual se reducen de \$3,371,107.69 a \$1,143,508.15 con Rotaflex; es decir una disminución del 66.08%.

6.5. Egresos Totales

La comparación entre los egresos totales del sistema actual y el propuesto se muestra a continuación.

COSTOS ANUALES POR CAMPO	SISTEMA ACTUAL (US\$/año)	ROTAFLEX (US\$/año)
Renta	\$ 21.801.450,00	\$ 17.629.500,00
Reacondicionamiento	\$ 4.099.676,00	\$ 2.487.000,00
Reparación	\$ 4.016.771,00	\$ 1.595.825,00
Consumo de energía	\$ 3.371.107,69	\$ 1.143.508,15
TOTAL EGRESOS	\$ 33.289.004,69	\$ 22.855.833,15

Figura 10. Costos Anuales por Sistema

Esto es una reducción del 31,34 % en gastos operacionales del campo de aplicarse el sistema de bombeo mecánico con unidad Rotaflex.

6.6. Ingresos

Son obtenidos por la producción del petróleo de los 69 pozos seleccionados.

Dependen del Net Back (90,00 US\$/BBL) y de los factores estadísticos MTTR y TF. Se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Ingresos Anuales} = \text{BPPD} \times \text{NetBack} \times (365 - (\text{MTTR} \times \text{TF}))$$

El total de ingresos anuales obtenidos de la producción de los 69 pozos por medio del sistema actual de levantamiento es de US\$ 458,780,969.54, mientras que al aplicar bombeo mecánico con Rotaflex obtendríamos US\$ 713,000,113.91; es decir, un incremento en los ingresos de \$ 254,219,144.37 (55.41%). En consecuencia, al finalizar la ejecución del proyecto con un tiempo de vida de 4 años, obtendríamos ingresos totales por US\$2,852,000,455.66.

6.7. Flujo de Caja

Se lo elabora considerando todos los ingresos y egresos anuales antes expuestos durante un tiempo de vida del proyecto de 4 años y se calculan los factores financieros VAN, TIR, Rentabilidad Financiera (ROE) y Eficiencia Económica asumiendo una Tasa de Descuento del 4.59%, valor suministrado por el Banco Central del Ecuador.

Los resultados obtenidos demuestran que el proyecto es altamente rentable, con poco riesgo de inversión, los beneficios económicos son 55% mayores que el total de la inversión requerida y la

cantidad de ingresos generados es mucho mayor con respecto a los insumos invertidos. Dichos factores financieros se muestran a continuación:

Tasa de descuento	0,0459
VAN	\$ 2.695.794.826,87
TIR	6376%
ROE	55,0%
Eficiencia	155%

Tabla 11. Factores Financieros calculados

7. Conclusiones

- El análisis técnico y el económico indican que los 69 pozos seleccionados son buenos candidatos para efectuar el cambio del sistema de levantamiento artificial que actualmente utilizan a bombeo mecánico con unidad de superficie Rotaflex.
- Utilizar la unidad de superficie de carrera larga Rotaflex resulta técnica y económicamente más rentable que la de bombeo mecánico convencional.
- La implementación de bombeo mecánico con unidad de superficie Rotaflex, reduciría la potencia (HP's) requerida en todo el campo en un 60.23%, lo cual significa una disminución en costos de generación de energía eléctrica del 66.08%. También se reducen los costos de Reparación en un 60.27% y los de Reacondicionamiento en un 39.34%.
- Para el campo Sacha el cambio de sistema propuesto significaría aumento en la producción de petróleo, reducción de gastos operacionales y de mantenimiento.
- Los resultados de los Factores Financieros indican que el proyecto de inversión analizado es eficiente, económicamente viable, con bajo riesgo y alta rentabilidad.
- Por tratarse de un proyecto de inversión petrolera, es normal tanto que las cifras obtenidas en el análisis económico como los factores financieros sean altos.

- A medida que incremente el precio del barril de crudo, la rentabilidad del proyecto será cada vez mayor.

8. Agradecimientos

Agradezco a Dios por haberme permitido llegar hasta este día en el que cumplo una meta más, por haberme brindado fuerza y salud para llegar hasta aquí.

A mis padres por su apoyo incondicional y confianza.

Al Ing. Kléver Malavé por su guía, dedicación y tiempo invertido en este proyecto de tesis.

A todos y cada uno los que conforman la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, personal administrativo, profesores y amigos, porque todos juntos, de alguna u otra forma, hicieron posible el cumplimiento de esta meta.

9. Referencias

- [1] Beck Susan/Thomas Sid/Lem Jorge, Weatherford International®, Sistema de Levantamiento con Varillas Reciprocante, Houston, Texas, EE.UU., Julio, 2006.
- [2] Weatherford International Ltd., Unidad Rotaflex® de bombeo de carrera larga, Houston, Texas, EE.UU., 2007.
- [3] McCoy J.N, Rowlan O. Lynn, Podio A. L., Becker Dieter, Rotaflex Efficiency and Balancing, Southwestern Petroleum Short Course, Houston, Texas, EE.UU., 2000.
- [4] Weatherford International®, Artificial Lift System Overview, Houston-EE.UU., Marzo, 2006, 10 p.
- [5] Abarca Eddie, Control de Producción y Estatus de Pozos-Sacha-Rio Napo, Orellana, Ecuador, Julio, 2011.
- [6] Weatherford International® Artificial Lift System, 5 Steps to Artificial Lift Optimization, Houston, Texas, EE.UU., 2000.
- [7] Theta Oilfield Services Company, softwares de aplicación petrolera <http://www.gotheta.com/rodstar-d.asp>.
- [8] Petroleum Engineer Department, University of Miskolc, Hungary, Ways to Decrease Production Costs for Sucker-Rod Pumping, Hungary, 2000.
- [9] Banco Central del Ecuador <http://www.bce.fin.ec/frame.php?CNT=ARB0000006>
- [10] Concepto de Factores Estadísticos disponibles en Wikipedia http://en.wikipedia.org/wiki/Mean_time_to_repair



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA



[11] Concepto de Factores Estadísticos disponibles en Wikipedia

http://en.wikipedia.org/wiki/Failures_In_Time

[12] Conceptos de Factores Financieros disponibles en Wikipedia

http://es.wikipedia.org/wiki/Tasa_interna_de_retorno

[13] Conceptos de Factores Financieros disponibles en Wikipedia

http://es.wikipedia.org/wiki/Valor_actual_netto