

Modelo matemático para la determinación de impactos energéticos en el sistema de bombeo por
cavidades progresivas

Paula Katerine Murcia Blanco

Trabajo de Grado para Optar el Título de Magíster en Ingeniería de Hidrocarburos

Director

Erik Giovany Montes Páez

M.Sc. en Ingeniería de Hidrocarburos

Codirector

Javier Duran Serrano

M.Sc. en Ingeniería

Camilo Guerrero Martin

M.Sc. en Ciencia y Tecnología de Polímeros

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Maestría en Ingeniería de Hidrocarburos

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

A Alejandro, por su entereza, nuestro equipo y su amor incondicional.

*“El significado de elegancia es: pasar desapercibido, pero una vez percibido volverse
inolvidable”*

(Hno. Mauricio Maldonado Luna)

Agradecimientos

A mi familia, por su compañía con palabras de cariño y aliento, por su presencia en mi vida, indiscutiblemente por inculcarme el valor de la gratitud.

A la Universidad Industrial de Santander, por ser mi segundo hogar durante estos últimos años, por ser la institución en la cual los sueños se hacen realidad.

Al director de este proyecto y amigo, el docente Erik Montes, por siempre disponer de su tiempo y dedicación, por sus aportes en la presente investigación, por su excelente calidad humana y, sobre todo, por creer en mí.

A Camilo Guerrero, por su ayuda en lograr concretar esta propuesta de investigación y ser guía en este camino.

A Javier Duran Serrano, por su ánimo de colaboración, sus soluciones oportunas y su más simpática actitud en este proceso.

A Diego Monsalve, por acercarme al mundo de los sistemas de bombeo por cavidades progresivas.

A Fabián Pinto, por ser luz en este proyecto, por toda su colaboración, por ser un bacán, por su paciencia y dedicación en el conocimiento desde su labor de ingeniero enfocado en el diseño de sistemas de bombeo por cavidades progresivas.

Al médico Juan Paulo Serrano, por su amabilidad, por su atención en los acontecimientos de salud en cirugía general presentados durante el desarrollo de esta tesis de maestría.

En definitiva, a las personas mencionadas en esta página, por construir puentes de comunicación dejando huella en mi historia.

Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo General	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Sistemas de levantamiento artificial (SLA)	15
2.1 Sistema de bombeo por cavidades progresivas (PCP).....	16
2.1.1 Principios del PCP	17
2.1.2 Bomba de cavidad progresiva	18
2.1.2.1 Estator y rotor.	18
2.1.2.2 Elastómero.	19
2.2 Eficiencia energética.....	20
2.3 Modelos implementados en sistemas de bombeo por cavidades progresivas.....	22
2.4 Diseño del sistema de bombeo por cavidades progresivas.	24
3. Metodología	27
4. Análisis de sensibilidad en el ámbito energético	28
4.1 Diseño experimental	30
5. Modelo matemático para determinación de impactos energéticos	32
4.1 Condiciones del modelo.....	32
5.2 Planteamiento del modelo matemático	33

5.3 Validación del modelo	37
6. Aplicación del modelo matemático para determinar impactos energéticos.....	43
6.1 Aplicación del modelo al Pozo 1	43
6.2 Aplicación del modelo al Pozo 2	47
6.3 Aplicación del modelo al Pozo 3	51
6.4 Aplicación del modelo al Pozo 4	54
6.5 Aplicación del modelo al Pozo 5	58
7. Oportunidades de mejora en el sistema de bombeo por cavidades progresivas	61
8. Análisis de resultados	64
9. Conclusiones	68
10. Recomendaciones	70
Referencias Bibliográficas	72
Apéndices.....	76

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Variables implementadas en el análisis de sensibilidad.	29
Tabla 2 Coeficientes de correlación de las variables.	30
Tabla 3 Restricciones del modelo matemático.	35
Tabla 4 Información de diseño para el caso estudio.	37
Tabla 5 Potencia de bombas del Pozo 1.	45
Tabla 6 Potencia y caudal de bombas Pozo 1.	45
Tabla 7 Eficiencia energética de las bombas para el Pozo 1.	45
Tabla 8 Consumo energético para el Pozo 1.	46
Tabla 9 Ahorro en costo y consumo energético para el Pozo 1.	46
Tabla 10 Potencia de bombas del Pozo 2.	48
Tabla 11 Potencia y caudal de bombas Pozo 2.	49
Tabla 12 Eficiencia energética de las bombas para el Pozo 2.	49
Tabla 13 Consumo energético para el Pozo 2.	49
Tabla 14 Ahorro en costo y consumo energético para el Pozo 2.	50
Tabla 15 Potencia de bombas del Pozo 3.	52
Tabla 16 Potencia y caudal de bombas Pozo 3.	52
Tabla 17 Eficiencia energética de las bombas para el Pozo 3.	52
Tabla 18 Consumo energético para el Pozo 3.	53
Tabla 19 Ahorro en costo y consumo energético para el Pozo 3.	53

Tabla 20 Potencia de bombas del Pozo 4.....	55
Tabla 21 Potencia y caudal de bombas Pozo 4.....	56
Tabla 22 Eficiencia energética de las bombas para el Pozo 4.....	56
Tabla 23 Consumo energético para el Pozo 4.....	56
Tabla 24 Ahorro en costo y consumo energético para el Pozo 4.....	57
Tabla 25 Potencia de bombas del Pozo 5.....	59
Tabla 26 Potencia y caudal de bombas Pozo 5.....	59
Tabla 27 Eficiencia energética de las bombas para el Pozo 5.....	59
Tabla 28 Consumo energético para el Pozo 5.....	60
Tabla 29 Ahorro en costo y consumo energético para el Pozo 5.....	60
Tabla 30 Porcentajes de error promedio de los pozos.....	65
Tabla 31 Eficiencia energética de los pozos.....	66
Tabla 32 Porcentajes de error de las bombas seleccionadas.....	66
Tabla 33 Ahorro en consumo energético de los pozos.....	67
Tabla 34 Costos por consumo energético en los pozos.....	68

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Esquema general sistema de bombeo por cavidades progresivas.	18
Figura 2. Bomba del sistema de bombeo por cavidades progresivas.	19
Figura 3. Metodología planteada para el modelo presentado.	27
Figura 4. Grado de impacto de las variables sobre la potencia del sistema.	31
Figura 5. Diagrama de flujo del planteamiento del modelo.	36
Figura 6. Datos de entrada suministrados.	38
Figura 7. Datos de salida.	39
Figura 8. Tipos de bombas implementadas.	40
Figura 9. Manejo de datos para el caso estudio.	41
Figura 10. Validación modelo caso estudio.	42
Figura 11. Información de diseño para el Pozo 1.	43
Figura 12. Potencia vs caudal para el Pozo 1.	44
Figura 13. Potencia vs Caudal de la bomba seleccionada para el Pozo 1.	47
Figura 14. Potencia vs caudal para el Pozo 2.	48
Figura 15. Potencia vs Caudal de la bomba seleccionada para el Pozo 2.	50
Figura 16. Potencia vs caudal para el Pozo 3.	51
Figura 17. Potencia vs Caudal de la bomba seleccionada para el Pozo 3.	54
Figura 18. Potencia vs caudal para el Pozo 4.	55
Figura 19. Potencia vs Caudal de la bomba seleccionada para el Pozo 4.	57

Figura 20. Potencia vs caudal para el Pozo 5.....	58
Figura 21. Potencia vs Caudal de la bomba seleccionada para el Pozo 5.....	61
Figura 22. Planificación energética - oportunidades de mejora.....	62

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Criterio de selección para sistema de bombeo por cavidades progresivas	76
Apéndice B. Diseño de pozos con sistemas de bombeo por cavidades progresivas mediante software.....	77
Apéndice C. Aplicación del modelo propuesto: paso a paso.....	80

Resumen

Título: Modelo matemático para la determinación de impactos energéticos en el sistema de bombeo por cavidades progresivas*

Autor: Paula Katerine Murcia Blanco**

Palabras Clave: Sistema de Bombeo por Cavidades Progresivas, Eficiencia energética, Coeficiente de correlación.

Descripción:

En los pozos de petróleo cuando el diferencial de presión no es suficiente para que los fluidos del yacimiento se muevan naturalmente, se requiere suministrar energía adicional al fluido para llevar los mismos a superficie con la energía óptima al separador mediante un sistema de levantamiento artificial (SLA). Al momento de la selección y diseño del sistema de bombeo por cavidades progresivas se tienen en cuenta aspectos operacionales, financieros y del fluido, pero no el componente energético.

En este trabajo se propone un modelo matemático basado en el diseño del sistema de bombeo por cavidades progresivas (PCP) para la determinación de impactos energéticos partiendo de un análisis de sensibilidad mediante el coeficiente de correlación, acerca de variables operativas de un pozo incidentes en el ámbito energético del sistema, siendo para este caso de estudio la velocidad, la variable más relevante. El modelo determina la potencia requerida por el sistema en la implementación de tres tipos de bombas en 5 pozos detallando su consumo energético validándolo con datos reales de un sector de un campo colombiano, incorporando cálculos de eficiencia energética. Además, se plantean oportunidades de mejora mediante la planificación energética basada en la norma ISO 50001.

Se obtiene como resultado un rango de porcentajes de error de 2,72% y 15,29% en los cinco pozos estudiados en cada caso estudio del modelo con los datos reales. Los porcentajes de eficiencia energética para cada pozo varían entre 0,36% y 6,4%. Además, se evidencia un ahorro de consumo energético entre 382,4 kWh-año y 5207,4 kWh-año con la selección de la bomba más eficiente energéticamente.

* Tesis de Maestría

** Facultad de Ingenierías fisicoquímicas Escuela de Ingeniería de Petróleos. Maestría en Ingeniería de Hidrocarburos. Director: Erik Giovany Montes Páez. M. Sc. En Ingeniería de Hidrocarburos. Codirectores: M. Sc. Javier Duran Serrano, M. Sc. Camilo Guerrero Martin.

Abstract

Title: Mathematical model for the determination of energy impacts in progressive cavity pumping systems *

Author: Paula Katerine Murcia Blanco**

Key Words: Progressive Cavity Pumping System, Energy efficiency, Correlation coefficient.

Description:

In oil wells when the pressure differential is not sufficient for the reservoir fluids to move naturally, additional energy must be supplied to the fluid to bring the fluids to the surface with optimal energy to the separator through an artificial lift system (ALS). When selecting and designing the progressive cavity pumping system, operational, financial and fluid aspects are considered, but not the energy component.

This work proposes a mathematical model based on the design of the progressive cavity pumping (PCP) system for the determination of energy impacts based on a sensitivity analysis using correlation coefficient, about the operating variables of a well that affect the energy scope of the system, being for this case study the speed the most relevant variable. The model determines the power required by the system in the implementation of three types of pumps in 5 wells, detailing their energy consumption and validating it with real data from a sector of a Colombian field, incorporating energy efficiency calculations. In addition, improvement opportunities are proposed through energy planning based on the ISO 50001 standard.

As a result, the error percentages range from 2.72% and 15.29% for the five wells studied in each case study of the model with the actual data. The energy efficiency percentages for each well vary between 0.36% and 6.4%. In addition, energy consumption savings between 382.4 kWh-years and 5207.4 kWh-years are evident with the selection of the most energy efficient pump.

* Master's Thesis.

** Faculty of Physicochemical Engineering. Petroleum Engineering Institute. Master in Hydrocarbon Engineering. Director: Erik Giovany Montes Páez. M. Sc. Hydrocarbon Engineering. Co-directors: M. Sc. Javier Duran Serrano, M. Sc. Camilo Guerrero Martin.

Introducción

En la industria de los hidrocarburos nace la necesidad de implementar mecanismos como lo son los sistemas de levantamiento artificial encargados de proporcionar energía al fluido que se está produciendo para que este llegue al separador con la energía suficiente. Estos mecanismos involucran parámetros operacionales, condiciones del pozo como el estado mecánico y propiedades del fluido, todo esto con el fin de encontrar el sistema de levantamiento artificial óptimo para cada caso.

En Colombia, aproximadamente el 15.8% de los pozos de producción utilizan el sistema de bombeo por cavidades progresivas, denominado de esta forma debido a que emplea una bomba que posee un tornillo de lóbulos en forma helicoidal llamado “rotor” que gira alrededor de una camisa interior en la bomba llamada “estator”, generando el conjunto rotor-estator que forma las cavidades por las cuales se produce el bombeo del fluido. Generalmente para la selección de un sistema de levantamiento artificial solo se considera el ámbito técnico basado en la necesidad de completar la presión que requiere el sistema y el ámbito económico al cumplir con requerimientos financieros de la empresa. De tal forma que no se ha considerado el ámbito energético, modelos que permitan cuantificar y conocer los impactos que tiene la energía en un sistema de levantamiento artificial como lo es el sistema de bombeo por cavidades progresivas analizando los componentes general e individualmente para encontrar la configuración con el mejor desempeño energético.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Proponer un modelo matemático para la determinación de impactos energéticos en sistemas de bombeo por cavidades progresivas.

1.2 Objetivos Específicos

Realizar un análisis de sensibilidad a partir de la correlación de variables de diseño y desempeño energético del sistema de bombeo de cavidades progresivas.

Desarrollar un modelo que permita correlacionar las variables de diseño del sistema de bombeo por cavidades progresivas con el desempeño energético.

Aplicar el modelo matemático propuesto para determinar el desempeño energético un campo colombiano.

Plantear oportunidades de mejora mediante el cálculo de la eficiencia energética en el sistema de bombeo por cavidades progresivas.

2. Sistemas de levantamiento artificial (SLA)

Los pozos productores de petróleo y gas generalmente producen sus tasas de producción más altas al comienzo del ciclo de producción, después de lo cual la producción comienza naturalmente a disminuir. La mayoría de los pozos producen en un patrón predecible llamado curva de declinación, las cuales difieren entre sí dependiendo de la presión, tamaño de los yacimientos, mecanismos de desplazamiento, tipo de roca, entre otros. Por estas razones, se tiene en cuenta la generación de pronósticos de producción, donde surgen diferentes aplicaciones, como lo plantea Páez et al. (2016) mediante el uso de series de tiempo o nuevas metodologías para obtener mejores pronósticos de producción en Bello et al. (2021).

Cuando el diferencial de presión es insuficiente para que los fluidos del yacimiento fluyan naturalmente, se debe utilizar algún método para elevar estos fluidos hasta el separador con la energía óptima. Cada sistema es aplicable de acuerdo con las condiciones y entornos de cada pozo, hay variedad de ellos, Bellarby, (2009). Estos sistemas utilizados se denominan Sistemas de levantamiento Artificial, como lo menciona Nguyen, (2020) algunos de ellos son: Gas lift, Bombeo electro sumergible, Bombeo por cavidades progresivas, Bombeo mecánico, Plunger lift. Para modo de este proyecto de investigación se estudiará únicamente el sistema de bombeo por cavidades progresivas.

Desde el punto de vista técnico se debe considerar el estudio de aspectos como: ingreso de energía eléctrica al sistema (motor); aspectos mecánicos de superficie (cabezales, sistemas de transmisión de poleas); aspectos mecánicos en el sistema de varillas de bombeo (torque, fricción, fuerzas de contacto) y aspectos mecánicos en el fondo (interferencia entre rotor y estator). Así

mismo, es fundamental el entendimiento del diseño del sistema de bombeo por cavidades progresivas y su influencia en la eficiencia del sistema de levantamiento artificial.

Dentro del marco de los sistemas de levantamiento artificial se ha implementado el sistema de bombeo por cavidades progresivas en aplicaciones desafiantes cuando deben optimizarse las eficiencias operativas del sistema, Lea Jr, J. F., & Rowlan, L. (2019). El sistema de bombeo de cavidades progresivas (PCP) es utilizado en pozos de baja a moderada tasa de flujo, especialmente con shore para fluidos pesados y contenido de sólidos, Bellarby, J. (2009), en aplicaciones offshore es una tecnología esencial debido a su diseño versátil que le permite manejar partículas de arena, gas y emulsiones, Lehman, M. (2004). Además, proporcionan un método de elevación eficiente para pozos de crudo pesado. Nuevos diseños de PCP se están desarrollando con el fin de producir en pozos que operan bajo recuperación térmica, Al-Safran, E., Aql, A., & Nguyen, T. (2017).

Los problemas operacionales pueden afectar la producción, un ejemplo claro de ello es el bloqueo por gas como lo describe Quintero et al. (2017), con el objetivo de buscar alternativas para mejorar la producción a un costo viable. Estos problemas pueden mitigarse realizando una operación óptima y seleccionando los componentes adecuados en el sistema tanto en fondo como en superficie, ya que, permitirán una mejora del desempeño energético del sistema de levantamiento artificial.

2.1 Sistema de bombeo por cavidades progresivas (PCP)

El sistema de bombeo por cavidades progresivas o PCP (por sus siglas en inglés “Progressing Cavity Pump”) utiliza una bomba de desplazamiento positivo, este sistema tiene características únicas que lo hace diferentes de otros sistemas, tales como: tiene la capacidad de

producir fluidos con altas concentraciones de arena, puede manejar fluidos altamente viscosos, además, tiene habilidad para tolerar altos porcentajes de gas libre, Wittrisch & Cholet, (2012). En aplicaciones offshore es una tecnología esencial debido a su diseño versátil que le permite manejar partículas de arena, gas y emulsiones, Lehman, M. (2004).

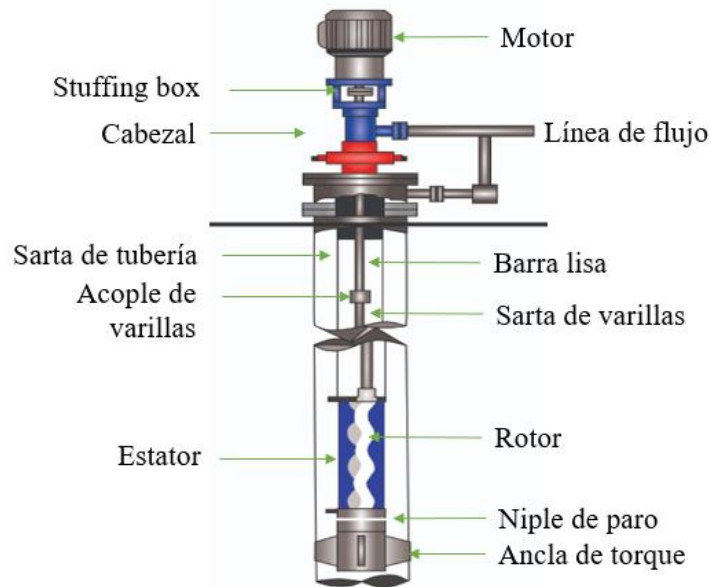
Existen criterios de selección para crudos pesados y extrapesados Camacho y Grosso (2003), aterrizando un poco más esta base al sistema de bombeo por cavidades progresivas se presenta un criterio de selección en el Apéndice A.

2.1.1 Principios del PCP

La bomba de cavidad progresiva (PCP) fue inventada por el francés, René Moineau, Moineau J (1932). La instalación típica del sistema de bombeo por cavidades progresivas contempla una serie de componentes tanto en fondo como en superficie los cuales son: Cabezal de transmisión, stuffing box, motor eléctrico, sarta de varillas, sarta de tubería, bomba, niple de paro y ancla de torque. El esquema general del sistema PCP se muestra en la figura 1.

Figura 1.

Esquema general sistema de bombeo por cavidades progresivas.



Nota. Adaptado de Ortega, D., Salinas, L., & Granados, D. (2014). Lessons learned and best practices for progressive cavity pumps systems in colombian fields.

2.1.2 Bomba de cavidad progresiva

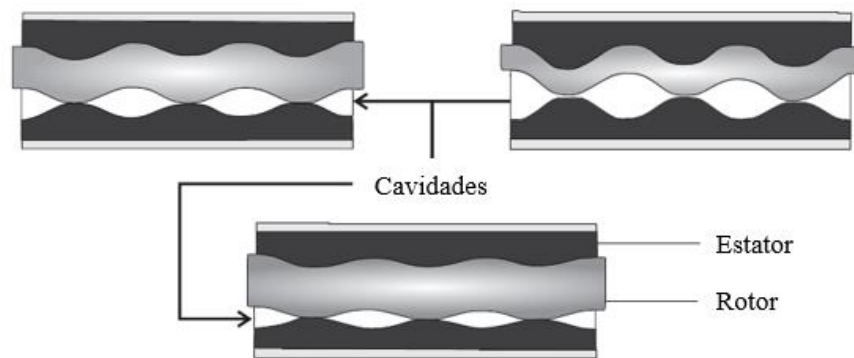
La bomba de cavidad progresiva es una parte fundamental del sistema, contempla el rotor, el estator y el elastómero el cual recubre el estator.

2.1.2.1 Estator y rotor. El diseño de la bomba se compone de dos engranajes helicoidales, uno dentro del otro, Nguyen (2020). Este tipo de bomba es de desplazamiento positivo, consta de dos componentes: el componente giratorio o rotor y el componente estacionario o estator, es la parte inmóvil del sistema recubierto por el elastómero, Lea et al., (2019). El rotor gira alrededor de su eje longitudinal, que es paralelo al eje del estator. El engranaje externo, es decir, el estator

siempre tiene un lóbulo de más que el interno, es decir, el rotor. De igual forma, el rotor está diseñado para que todos sus lóbulos estén en contacto constante con el estator. A medida que el rotor gira dentro del estator se forman las cavidades por las cuales se produce el bombeo del fluido. A medida, Boyce, (2005). Haciendo un acercamiento a la bomba PCP, la figura 2 muestra el rotor y el estator.

Figura 2.

Bomba del sistema de bombeo por cavidades progresivas.



Nota. Adaptado de Lea Jr, J. F., & Rowlan, L. (2019). Gas well deliquification. Gulf Professional Publishing.

2.1.2.2 Elastómero. Los elastómeros ofrecen resistencia a la abrasión debido a que pueden deformarse y permitir el paso de partículas grandes. Además, permiten un ajuste de compresión entre el rotor y el estator mediante una capacidad de “*self-priming*” o autocebado permitiendo bombear de manera eficiente fluidos con presencia de gas, de baja y alta viscosidad e incluso fluidos abrasivos, Boyce, (2005).

2.2 Eficiencia energética

Como lo afirma Schmidt, (2003) conforme a la energía eléctrica, en la industria de los hidrocarburos es comúnmente el componente de costo más significativo. El consumo de energía, la tasa de producción y la vida útil del equipo tienen un impacto significativo en el costo general de producción y principalmente en el de levantamiento (Lifting cost). La inversión en tecnologías energéticas más eficientes es a menudo la forma más rentable de mejorar el retorno de la energía en la inversión (EROI), como lo presentan Grassian & Olsen, (2021).

Long, J. F., Rowlan, L., & McCoy, J. (1999) argumentan que la eficiencia de un sistema de levantamiento artificial es una forma de calcular qué tan eficiente es un sistema de levantamiento en particular para proporcionar energía al levantar el fluido.

Hasta el momento se ha incorporado el concepto de eficiencia energética en la industria petrolera, Edwards, (2004) realizó el primer trabajo que involucró el concepto de eficiencia energética a los procesos de la industria petrolera, concretamente en exploración y producción. De igual forma, Voldsund et al, (2014) evalúa el desempeño de las operaciones realizadas durante el procesamiento del gas mediante indicadores que permitían conocer el uso de los recursos energéticos.

Según Acoltzi & Pérez, (2011) la norma ISO 50001 puede ser utilizada para tener certificación o registro del Sistema de Gestión de la energía (SGE) la cual trata acerca de elementos que interactúan para lograr objetivos energéticos y establecer políticas energéticas, dentro del marco de esta norma se vincula la eficiencia energética, definida por la misma norma como “razón u otra relación cuantitativa entre un resultado de desempeño, servicio, bienes o energía y una entrada de energía”.

Cabe resaltar que, es posible plantear una relación directa entre la eficiencia energética con la huella de carbono como lo plantea Useche et al. (2021) y realizar el cálculo de la huella de carbono emitida por este tipo de sistema de levantamiento artificial.

Como se puede apreciar, la eficiencia energética, sus respectivo concepto y aplicaciones son escasas en el análisis de los sistemas de levantamiento artificial, por lo tanto, se propone este trabajo como una alternativa para incorporar la eficiencia energética de los sistemas de levantamiento artificial, concretamente en el sistema de bombeo por cavidades progresivas, determinando impactos energéticos, conociendo el costo de energía, seleccionando adecuadamente componentes del sistema que se encuentran al alcance en el diseño (tipo de bomba, cabezales y motores), contribuyendo a la mejora de la energía requerida para su uso, por lo que, se plantea la eficiencia energética de la siguiente forma:

$$Eficiencia\ energética = \frac{(DP) * 100}{Pot_{Qref}} \quad (1)$$

Donde, la eficiencia energética está dada en (%), “ Pot_{Qref} ” es la potencia a un caudal de referencia dada en (HP) y “DP” está dado en (HP), es un diferencial de potencia traducido de la siguiente manera:

$$Eficiencia\ energética = \frac{(Pot_{Qref} - Pot_{basemin}) * 100}{Pot_{Qref}} \quad (2)$$

Donde, se detalla el diferencial de potencia con “ $Pot_{basemin}$ ” siendo la potencia base mínima común entre las bombas estudiadas. Esto se describe en el capítulo 5 del presente documento.

A continuación, se describen modelos implementados en el sistema de bombeo por cavidades progresivas y se especifica cuáles de ellos han tenido alguna relación con la eficiencia energética.

2.3 Modelos implementados en sistemas de bombeo por cavidades progresivas

Moineau, (1930), René Moineau logró su doctorado en ciencias en la Universidad de París por su tesis sobre el "nuevo capsulismo" siendo el pionero y quien sentó las bases para comenzar la historia de las bombas de cavidades progresivas. A lo largo de la historia han surgido grandes aplicaciones industriales que hacen de esta bomba de desplazamiento positivo una de las tecnologías más utilizadas para mover fluidos tales como petróleo arenoso hasta lodos.

Se han desarrollado algunos modelos en este tipo de sistema de levantamiento artificial, algunos de ellos han tratado simulaciones en una sola fase Nguyen et al., (2016), como Andrade et al., (2010) presenta un modelo asintótico para describir el flujo monofásico dentro de las bombas de cavidades progresivas, fue desarrollado para estudiar el efecto de la geometría, las propiedades del fluido y los parámetros operativos en las curvas de rendimiento de la bomba, además, se puede utilizar en el diseño de nuevos procesos de bombeo. Este modelo es basado en la Ley de Stokes, dirige su búsqueda a la comprensión fundamental del flujo en las bombas de cavidades progresivas considerando que este factor representa un paso importante en la optimización de la eficiencia de estas bombas teniendo en cuenta el carácter transitorio del flujo, los límites de movimiento y la diferencia en la escala de longitud de la altura del canal entre el estator y el rotor. Relaciona las ecuaciones de Navier-Stokes y de continuidad, las cuales rigen el flujo dentro de las cavidades de la bomba.

Seguidamente, Chen et al., (2013) establecen un modelo de elementos finitos para sistema de bombeo por cavidades progresivas que consiste en el estator, el rotor, el fluido elevado y la interacción fluido-sólido. Este modelo surge del problema del deslizamiento interno que ocurre en el funcionamiento del PCP, por lo cual definen el rendimiento de la bomba en términos de

eficiencia volumétrica y capacidad de elevación. Además, este modelo realiza interacción fluido-estructura fue utilizado para comparar las curvas características hidráulicas de PCP convencionales, de espesor uniforme, estudiar la influencia de diferentes parámetros de material y estructura en el deslizamiento interno del sistema de levantamiento artificial. De la simulación numérica evidencian dos mecanismos de fuga: deslizamiento transversal y deslizamiento longitudinal. Asimismo, concluyen que dos factores principales que influyen en la eficiencia volumétrica son la interferencia y el grosor del estator, pueden utilizarse para optimizar el diseño de PCP para fines específicos.

Con una idea de uno de los factores concluidos anteriormente, Chen et al., (2015) proponen modelos de elementos finitos de bombas de cavidades progresivas convencionales e incluso bombas de espesor uniforme con los mismos parámetros estructurales con el objetivo de encontrar el mecanismo de falla adhesiva. La bomba PCP de espesor uniforme tiene numerosas ventajas en comparación con la bomba convencional de PCP, algunas de ellas son: expansión térmica y de hinchamiento uniforme, un funcionamiento estable y una alta eficiencia volumétrica. Primordialmente estudian las condiciones de fuerza de la interfaz adhesiva que une el estator y la camisa del cilindro. Concluyen que, la tensión de corte aumenta enormemente y la falla adhesiva tiende a ocurrir en ciertas condiciones, esto es de gran importancia para guiar el diseño y la optimización de PCP de espesor uniforme.

Ceballos et al., (2019) proponen un modelo matemático para controladores de las bombas de cavidad progresiva, de igual forma, simulan numéricamente estrategias de control continuas, incluyendo lógica difusa. Involucran la eficiencia debido a que es un tema central, especialmente cuando se trata de producción de energía. Este modelo se basa en la ley de Darcy, está enfocado en el modelado de la bomba relacionando la velocidad de esta con las revoluciones por minuto. Se

emplean datos del pozo, yacimiento y del sistema PCP involucrando ecuaciones que relacionan la velocidad de bombeo. Además, el torque de la bomba tiene una parte hidráulica y un componente asociado con la fricción. Estos factores son comprendidos en el planteamiento del modelo matemático para controladores de bombas de cavidad progresiva.

Nguyen et al., (2021) investigan el efecto de las condiciones en fondo de pozo en la deformación del estator desarrollando un modelo analítico basado en la ley de Hooke y la teoría del cilindro compuesto.

Los modelos existentes para sistema de bombeo por cavidades progresivas involucran únicamente el desempeño de las bombas en aspectos como geometría, velocidad, propiedades del fluido, parámetros estructurales y parámetros operativos en las curvas de rendimiento de la bomba, entre otros. Para modo de este trabajo se contemplarán algunos de esos aspectos no solo para el desempeño de las bombas sino para el desempeño total del sistema, analizando desde el punto de vista de diseño del sistema los componentes incidentes en el ámbito energético junto con datos producción de crudo, datos del fluido, datos del pozo, datos operacionales, costos energéticos de un campo petrolero colombiano. De esta forma, se tiene en cuenta como base el diseño del sistema de bombeo por cavidades progresivas, donde se plantean las capacidades del sistema.

2.4 Diseño del sistema de bombeo por cavidades progresivas.

Desde el punto de vista del diseño del sistema se detallan las variables que están involucradas en las ecuaciones de diseño, con ello se da el primer paso del análisis de sensibilidad resaltando la relevancia de cada una de ellas en el ámbito energético. Las ecuaciones de diseño de

sistemas PCP como lo presenta Ciulla (1999) implementadas en la investigación son mostradas en el ítem 2.4 del presente trabajo.

La capacidad de desplazamiento es definida como el volumen de fluido producido por la bomba por cada rotación del rotor, desde allí se plantea el caudal de diseño. De tal forma:

$$Q_{diseño} = \frac{100 * Q_{req}}{\eta} \quad (3)$$

Donde “Qreq” representa el caudal requerido en (Bls/día) teniendo en cuenta una eficiencia volumétrica “η” dada en (%), obteniendo el caudal de diseño “Q_{diseño}” en (Bls/día).

Continuando con la capacidad de desplazamiento teniendo en cuenta el caudal de diseño y la velocidad del sistema, se obtiene:

$$CD = \frac{Q_{diseño}}{V} \quad (4)$$

Donde “V” es la velocidad de operación del sistema dada en (RPM), junto con “Q_{diseño}” determina “CD” la capacidad de desplazamiento en (Bls/día/RPM).

Continuando con la capacidad de desplazamiento, es evaluada por el levantamiento neto requerido donde “P_{levantamiento}” dado en (psi) es definido como el diferencial de presión de descarga “P_{descarga}” y presión de entrada de la bomba “P_{entrada}”, determinando cada una de ellas:

$$P_{levantamiento} = P_{descarga} - P_{entrada} \quad (5)$$

$$P_{entrada} = P_{CHP} + P_{gas} + P_{liq} \quad (6)$$

$$P_{descarga} = P_{THP} + P_{liq} + P_{pérdidas} \quad (7)$$

Donde la presión de entrada en la bomba es la suma de las presiones “P_{CHP}” presión en cabeza de pozo en el *casing* por sus siglas en inglés *Casing Head Pressure* y la presión del fluido, “P_{gas}” presión del gas y “P_{liq}” presión del líquido. La presión de descarga de la bomba “P_{descarga}”

es la suma de las presiones “ P_{THP} ” presión en cabeza de pozo del tubing por sus siglas en inglés *Tubing Head Pressure*, “ P_{liq} ” la presión ejercida por el líquido y las pérdidas de presión “ $P_{pérdidas}$ ”, las presiones expresadas en (psi). Posteriormente se tiene la capacidad de levantamiento contemplando el gradiente de presión, con esta información se escoge el tipo de bomba a ser implementada en campo.

La energía requerida para hacer girar el rotor y mover el fluido es suministrada a la bomba en forma de torque. El torque del sistema contempla la sumatoria del torque hidráulico, el cual es necesario para vencer la presión diferencial en la bomba, el torque por fricción y el torque por resistencia.

$$T_{total} = T_{hidráulico} + T_{fricción} + T_{resistencia} \quad (8)$$

Se puede establecer la potencia requerida por la bomba de la siguiente manera:

$$Pot_{bomba} = 1,91 \times 10^{-4} * T_{bomba} * V \quad (9)$$

Donde “ Pot_{bomba} ” esta dada en HP. “ T_{bomba} ” es el torque en la bomba que es el resultado de la suma del torque hidráulico y el torque por fricción, dado en ft lbs y “ V ” es la velocidad (RPM). La potencia de la bomba es la más representativa del sistema, de esta forma, proporciona una idea de la potencia requerida por el sistema como se evidencia a continuación:

$$Pot = \frac{1.917 \times 10^{-4} * T_{total} * V}{Ef_t} \quad (10)$$

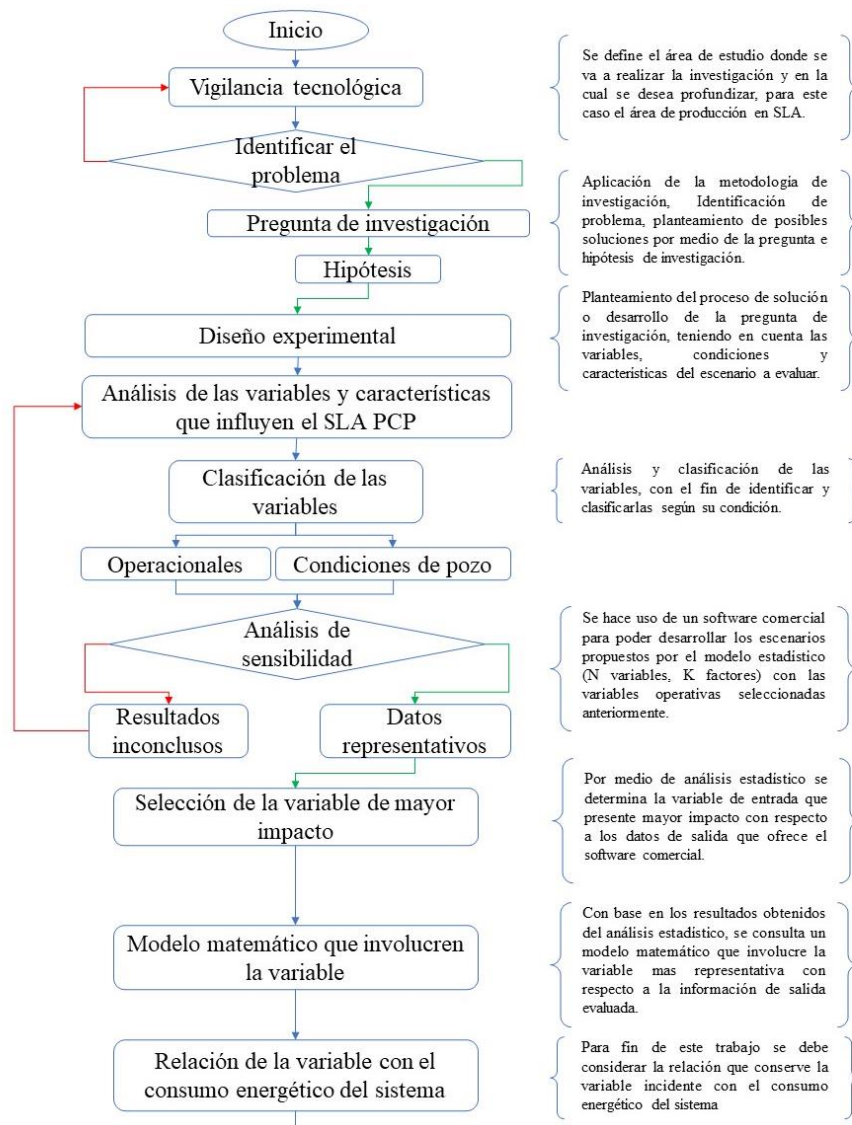
Donde “ Pot ” es la potencia requerida por el sistema en (HP). “ T_{total} ” es el torque total que contempla el torque hidráulico, torque por fricción y torque de resistencia, dado en ft-lbs. “ V ” es la velocidad en RPM. “ Ef_t ” es la eficiencia de transmisión del sistema en (%).

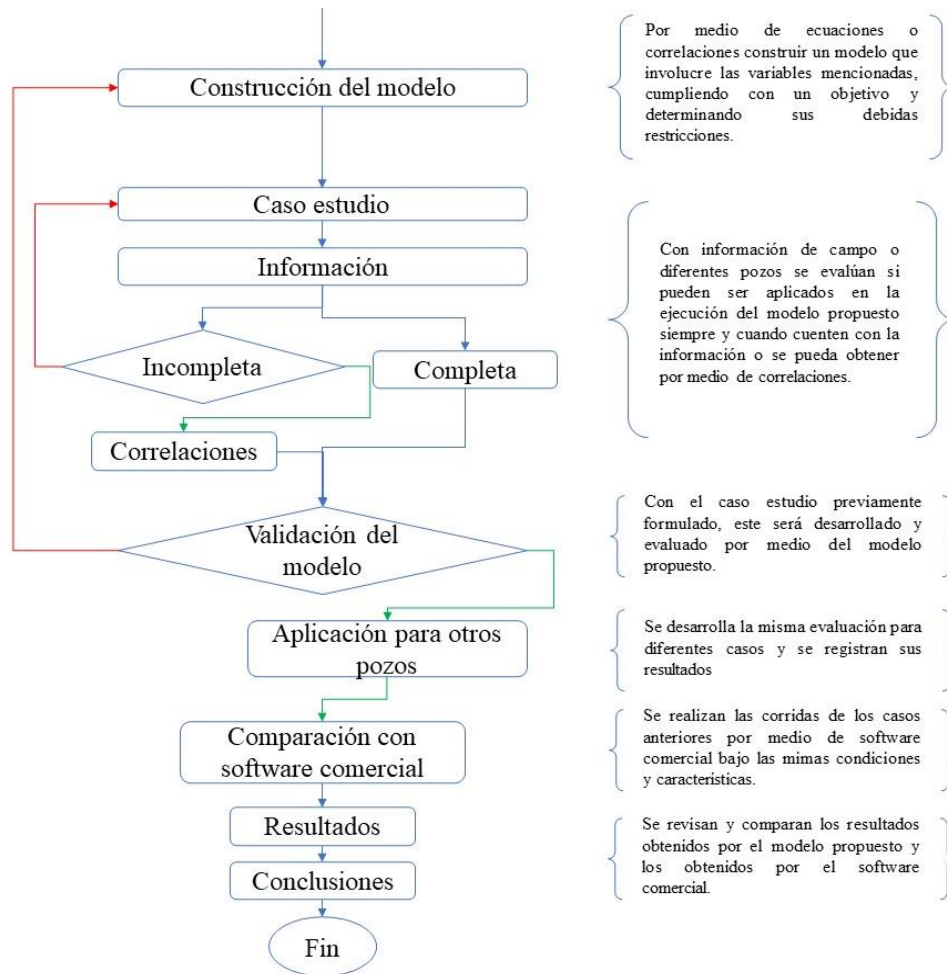
3. Metodología

La metodología implementada en el desarrollo del presente trabajo se detalla a continuación en la figura 3

Figura 3.

Metodología planteada para el modelo presentado.





Con base en la metodología descrita previamente, se da paso en el siguiente capítulo el desarrollo del análisis de sensibilidad.

4. Análisis de sensibilidad en el ámbito energético

Se plantea un análisis de sensibilidad mediante un análisis del coeficiente de correlación, teniendo en cuenta los datos de un campo colombiano donde se selecciona un sector “*sector well*”

model” concretamente “*single well model*”, es decir, un pozo como caso de estudio con el objetivo de determinar la incidencia de variables en el ámbito energético del sistema, tomando como referencia las variables involucradas en el diseño, debido a que, son las variables que se encuentran en alcance operativo, con las cuales se pueden establecer variaciones del caso de estudio en el diseño y simulación.

Tabla 1.

Variables implementadas en el análisis de sensibilidad.

Variable	Valores	Rangos
Velocidad (RPM)	80	Velocidad mínima operativa
	150	Velocidad implementada en campo
	220	Velocidad implementada en campo
Motor (HP)	75	
	100	
	150	
	2650	
Profundidad de asentamiento (ft)	2900	Rangos seleccionados de campo
	3300	
	300	
Presión de fondo (psi)	432	Rangos seleccionados de campo
	461	

Utilizando este pozo como el caso base de estudio donde se tienen variables que son características del yacimiento como lo son las propiedades del fluido, por ende, son similares en los pozos estudiados en la presente investigación. Además, se encuentran parámetros en el diseño que serán implementados en los pozos estudiados debido a su disponibilidad en campo, tales como: tipos de cabezal, motores, casing, tubing, tipos de bomba.

4.1 Diseño experimental

Se plantea un diseño experimental de 4 variables y 3 factores como se muestra en la tabla 1 , dando como resultado 81 escenarios de simulaciones, siendo el número de combinaciones posibles para la ejecución del análisis.

El coeficiente de correlación de Pearson es una de las mediciones más utilizadas para determinar dependencias entre datos Abounaima et al., (2020). De tal manera que, se plantea el análisis estadístico del coeficiente de correlación haciendo uso del software Microsoft Excel. El resultado se muestra en una matriz en la tabla 2, donde se presenta el grado de impacto de cada variable de entrada con respecto a la variable de salida. Para este caso la variable de interés y de salida es la potencia, para determinar impactos energéticos.

Tabla 2.

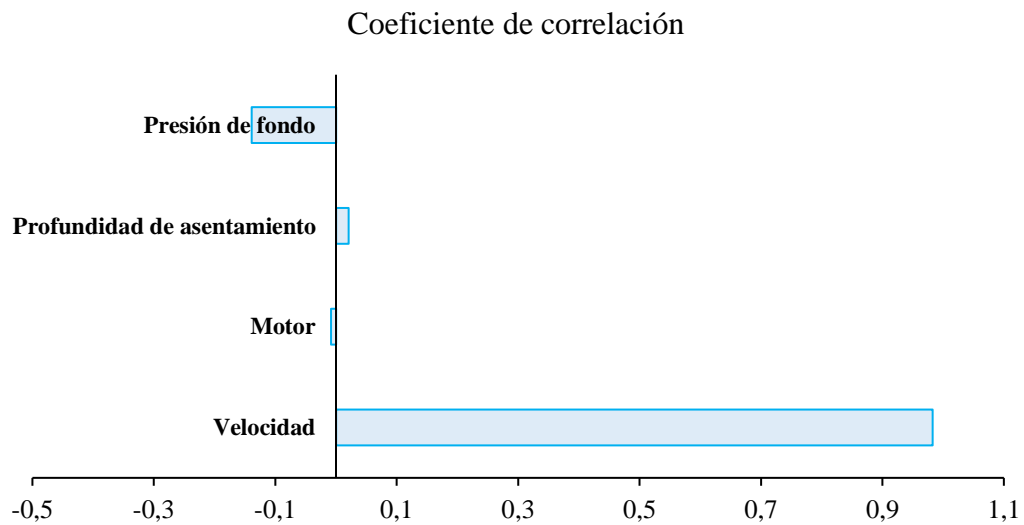
Coefficientes de correlación de las variables.

	Velocidad	Motor	Profundidad de asentamiento	Presión de fondo	Potencia
Velocidad	1				
Motor	6,30057E-18	1			
Profundidad de asentamiento	0	-3,2284E-17	1		
Presión de fondo	0	-2,3127E-17	0	1	
Potencia	0,982713195	-0,00794947	0,020892482	-0,138721924	1

La última fila de la tabla 2 es la fila de interés en este análisis de correlación debido a que, contiene la ponderación del impacto de las variables incidentes en la potencia como se muestra en la figura 4.

Figura 4.

Grado de impacto de las variables sobre la potencia del sistema.



A partir de los resultados obtenidos del análisis de correlación, se puede evidenciar que la variable más representativa incidente en la potencia del sistema es la velocidad con un valor de 0,98 en una escala de -1 a 1. Esta variable representa una relación lineal directa con la variable de salida, es decir, la potencia.

Con base en los resultados se procede a contemplar las ecuaciones de diseño del sistema que involucran la variable representativa del análisis de sensibilidad para dar continuidad a la construcción del modelo matemático descrito en el siguiente capítulo.

5. Modelo matemático para determinación de impactos energéticos

Como se menciona en el ítem 1.3 del presente trabajo, los modelos desarrollados actualmente para sistemas de bombeo por cavidades progresivas se enfocan en el estudio del desempeño de la bomba: en Andrade et al., (2010) investiga aspectos relevantes en las curvas de rendimiento, en Chen et al., (2013) y Chen et al., (2015) se enfocan en la interacción fluido-sólido, (K. Nguyen et al., 2021) expone el efecto de las condiciones de fondo en la bomba, concretamente en la deformación del estator y Ceballos et al., (2019) marca el precedente de la incorporación de la eficiencia en las bombas de cavidad progresiva no se representa un análisis general en la determinación de impactos energéticos en cuanto a la potencia requerida por el sistema.

4.1 Condiciones del modelo

- El pozo debe aplicar a los criterios de selección del sistema de levantamiento artificial, el screening que se muestra en el Apéndice A.
- PCP convencional
- Pozo vertical
- Tener disponible la información de diseño para sistemas de bombeo por cavidades progresivas tales como: geometría del pozo (Profundidad Media, Azimut, Inclinación), profundidades (Punto Medio de Perforados, Profundidad de asentamiento de la bomba), especificaciones de la bomba (Tipo de bomba, eficiencia volumétrica, torque por fricción), tipo de varilla, talla – medida del casing y tubing, equipo de superficie (cabezal, motor, relación de poleas),

datos del fluido ($^{\circ}$ API, salinidad del agua, GOR, gravedad específica del gas, BS&W, corte de agua), datos operacionales (Q, THP, CHP, sumergencia).

- $Q_{diseño}$ y V en rangos de restricción del modelo.
- Revisión de disponibilidad de equipos o equipamiento del sistema en el campo

5.2 Planteamiento del modelo matemático

Teniendo en cuenta las ecuaciones de diseño del sistema de bombeo por cavidades progresivas presentadas en el primer capítulo, ítem 1.4, se procede al planteamiento del modelo propuesto en esta investigación. Iniciando con la determinación del caudal de diseño, el cual es función del caudal requerido y la eficiencia volumétrica, como se muestra a continuación:

$$Q_{diseño} = f(Q_{req}, \eta) \quad (11)$$

Conociendo la capacidad de desplazamiento (CD) como se describe en la Ecuación 4, se establece en función de la variable de respuesta: la velocidad. Estableciendo como función:

$$V = f(Q_{diseño}, CD) \quad (12)$$

Donde:

$$V = \frac{Q_{diseño}}{CD} \quad (13)$$

De la combinación de las funciones estipuladas en las Ecuaciones 11 y 12, para la Ecuación 10, se obtiene la potencia en función del torque total, eficiencia total del sistema y la velocidad expresada en términos de caudal de diseño y capacidad de desplazamiento:

$$Pot = f(T_{total}, Q_{diseño}, CD, Ef_t) \quad (14)$$

Se realiza el planteamiento del modelo matemático, vinculando el planteamiento de la Ecuación 14, dando como resultado el modelo propuesto en este estudio como se presenta a continuación:

$$Pot = f \left(\frac{1.917 \times 10^{-4} * T_{total} * \frac{Q_{diseño}}{CD}}{Ef_t} \right) \quad (15)$$

Donde el torque total (T_{total}) es constante dependiente de cada escenario planteado, el caudal de producción ($Q_{diseño}$) va acorde con las restricciones y condiciones del pozo, la capacidad de desplazamiento (CD) es constante dependiendo de cada tipo de bomba implementada y la eficiencia de transmisión (Ef_t) es constante aplicada en pozo dependiente del equipamiento.

En el planteamiento del modelo se contempla la variable representativa del análisis de sensibilidad detallada en el capítulo 3 de este estudio relacionándola directamente con la potencia requerida por el sistema.

El planteamiento consiste en partir de un modelo de programación lineal en el cual la potencia requerida es directamente proporcional a la producción del pozo. A medida que la velocidad aumenta, el caudal de producción aumenta. Con base en el planteamiento del modelo se propone su objetivo y sus restricciones.

Objetivo: definir el menor requerimiento de potencia con la finalidad de maximizar la producción de crudo respetando las restricciones.

Restricciones: Potencia máxima para la obtención de mayor caudal y potencia mínima para la obtención de mayor caudal, en los intervalos propuestos para el caudal y la velocidad, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3.

Restricciones del modelo matemático.

Restricciones		Rangos	
		Min	Max
Caudal de producción	Bls/día	300	600
Velocidad	RPM	80	180

Para cada bomba implementada se realiza el cálculo teórico de la velocidad como se muestra en la Ecuación 13 y se tabulan los datos en los intervalos de caudal requerido por el diseño del pozo. Para mejor detalle de este proceso, se presenta en el Apéndice C.

El proceso de construcción del modelo es conceptual y al final es contrastado con datos reales del software de diseño de sistemas de bombeo por cavidades progresivas.

Por medio del siguiente diagrama se presenta el proceso del modelo matemático propuesto que determina la potencia requerida por el sistema de bombeo por cavidades progresivas, como se muestra en la figura 5.

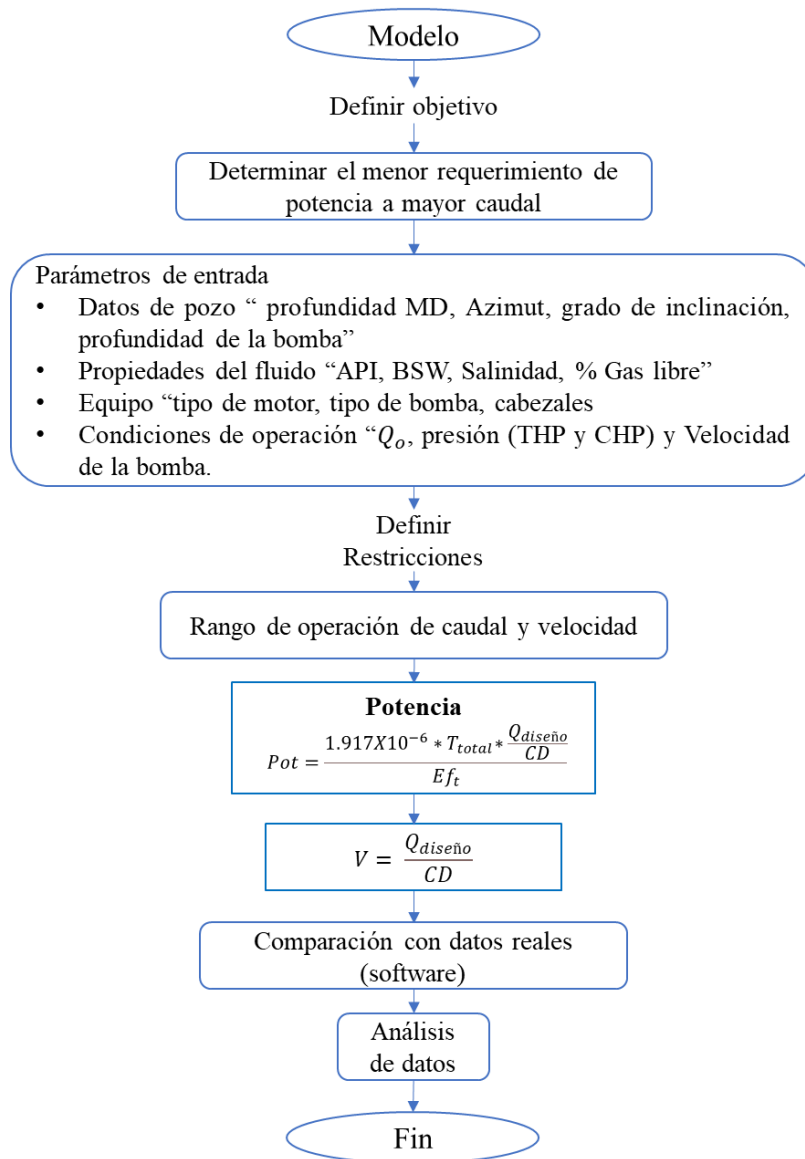
El modelo funciona por el comportamiento lineal que mantiene entre la potencia y el caudal de producción, detallado en el ítem 4,3 del presente trabajo. Si se extiende el modelo a otros pozos debe tenerse en cuenta las restricciones establecidas dadas por la compañía operadora, algunas de ellas dadas en: caudal de operación (puede ser determinado por curvas IPR “*Inflow Performance Relationship*” o analogía de pozos vecinos) y velocidad de operación (puede ser determinado por viscosidad o contenido de sólidos).

En otros campos, el modelo puede ser diferente porque cambian las condiciones de yacimiento, lo que implicaría que el sistema artificial adecuado para los pozos de esos campos cambie y PCP no sea el más acorde. Si el manejo de sólidos continua presente en el campo se

entraría en detalle en el potencial de caudal de cada pozo, los rangos de operación de caudal y velocidad pueden ser diferentes de acuerdo con el histórico de cada pozo, para que sea posible aplicar el modelo propuesto en la presente investigación se deben contemplar que las condiciones de los nuevos pozos a evaluar cumplan con las restricciones.

Figura 5.

Diagrama de flujo del planteamiento del modelo.



5.3 Validación del modelo

Para la validación del modelo planteado en la Ecuación 12, se propone aplicarlo en el caso estudio de un pozo de un campo colombiano donde las características y condiciones de diseño se describen en la tabla 4.

Tabla 4.

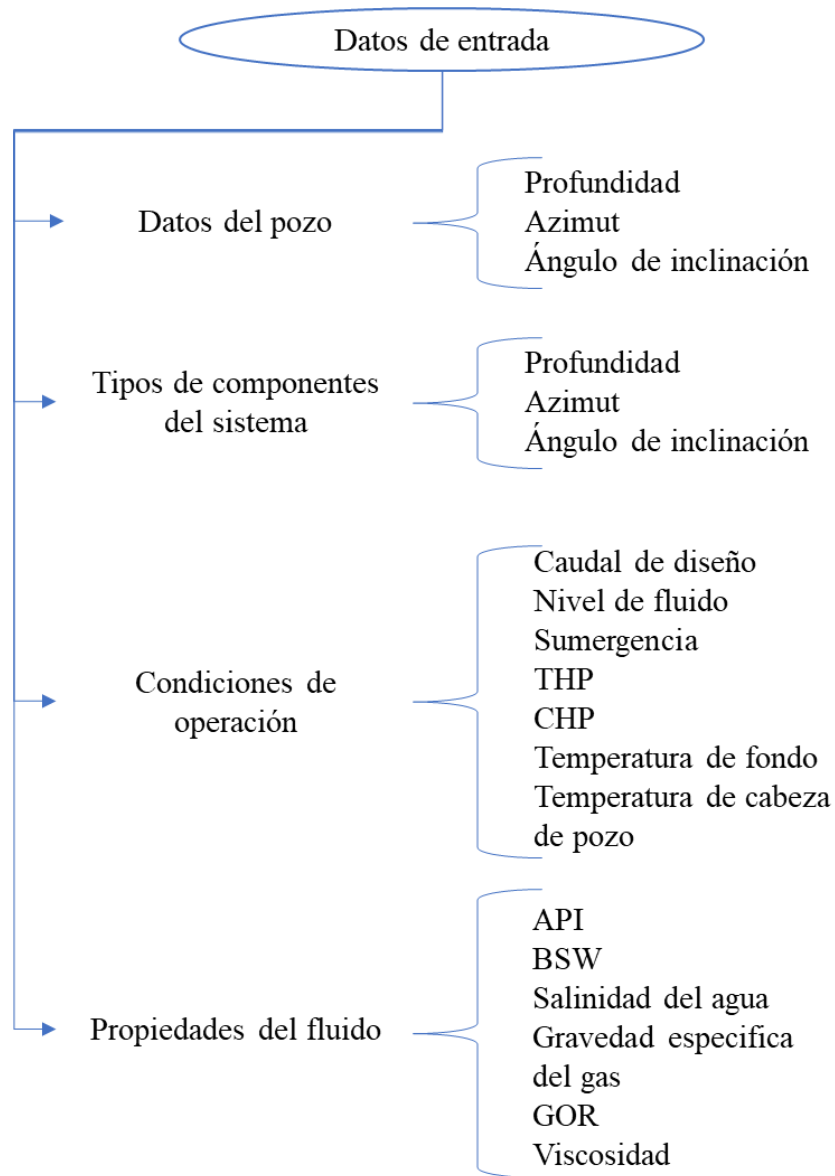
Información de diseño para el caso estudio.

INFORMACIÓN DE POZO		PROPIEDADES DEL FLUIDO	
Casing	7" P-110, 29 lbs/ft	API	21°
Tubing	3.5" 9.3 lbs/ft	Salinidad del agua	4000 ppm
Varillas	970N 1-1/8"	Gravedad específica del gas	0.7
Perforados	3610 ft	GOR	50 scf/STB
Prof asent bomba	2950 ft	BS&W	90%
DATOS DE PRODUCCIÓN		PARÁMETROS DE DISEÑO	
Producción estimada	600 Bls/día	Velocidad máxima	180 RPM
Corte de agua	96%	Eficiencia de la bomba	60%
Sumergencia	200 ft	Eficiencia del cabezal	95%
THP	90 psi	Eficiencia de las correas	97%
CHP	0 psi	Max carga de presión bomba	80%
		Costo de energía	0.14 USD/kWh

De acuerdo con los requerimientos se procede a realizar el diseño del pozo en el software comercial, donde se requiere suministrar los datos de entrada como se muestra en la figura 6 y los datos de salida presentados en la figura 7, como se muestra a continuación.

Figura 6.

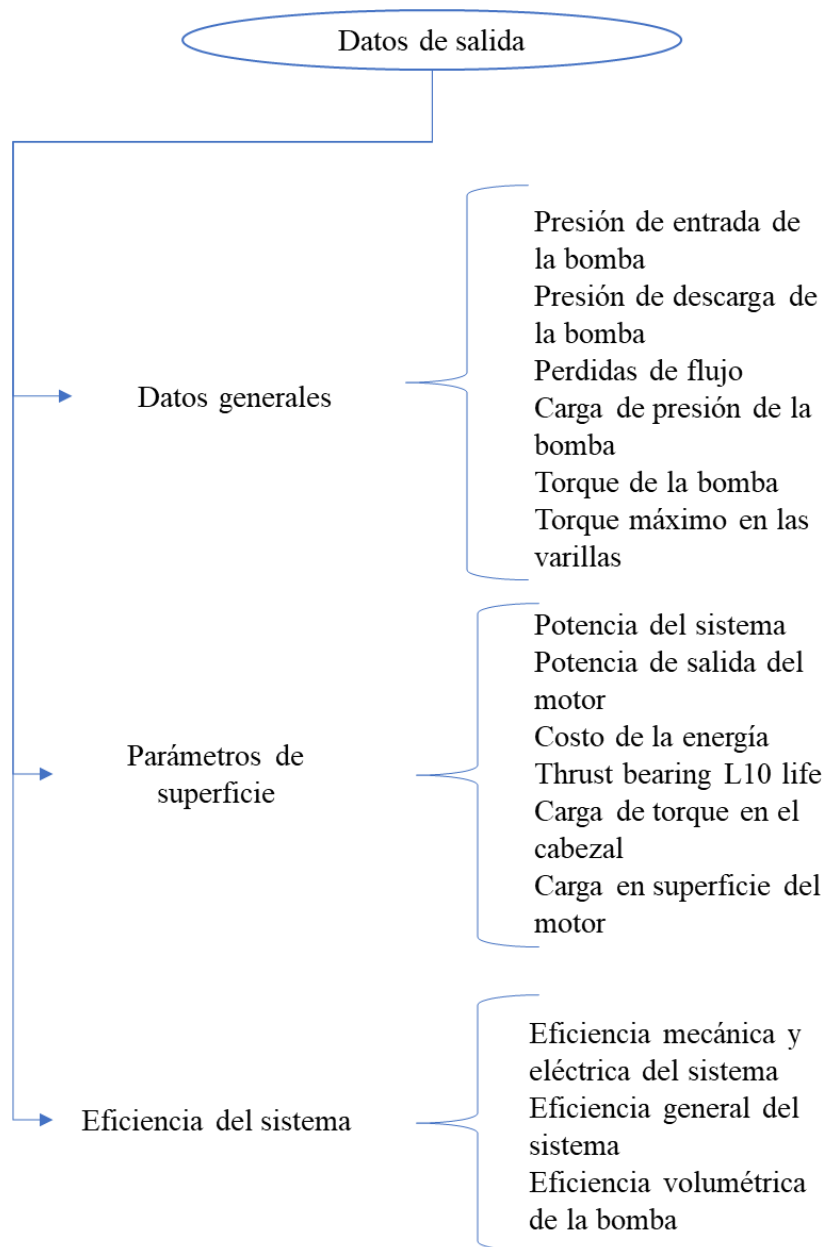
Datos de entrada suministrados.



Con la información en el software, se realizaron las respectivas corridas de simulación obteniendo los siguientes resultados:

Figura 7.

Datos de salida.

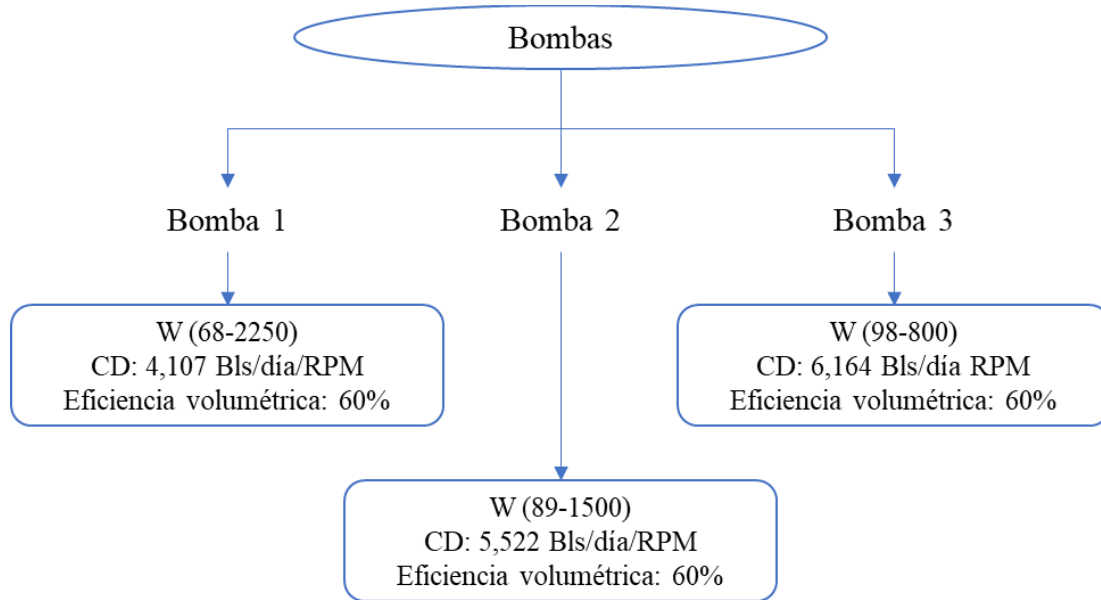


Para modo de este estudio se tiene en cuenta la disponibilidad de tres bombas en el campo, como se presenta en la figura 8, las cuales poseen diferente capacidad de desplazamiento

(pequeñas, mediana y grande) en Bls/día/RPM de (4.107, 5.522 y 6.164) respectivamente, que cumplen con el caudal requerido para este caso.

Figura 8.

Tipos de bombas implementadas.

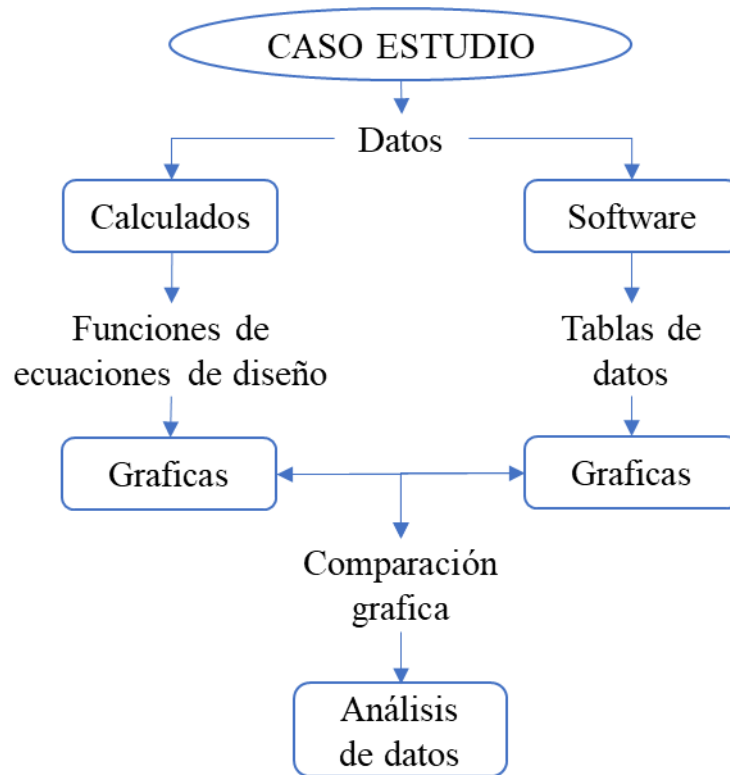


Se procede con establecer los escenarios que se encuentran en el rango válido entre las restricciones que se encuentran en la tabla 3 e implementando los tres tipos de bomba que se describen anteriormente, donde para cada escenario se calcula la velocidad de operación, el torque total, tomando en cuenta la eficiencia de transmisión del sistema de 95%, hallando la potencia requerida por el sistema mediante el modelo matemático, como se evidencia en el Apéndice C.

El manejo de los datos se plantea de la siguiente forma, como se muestra en la figura 9.

Figura 9.

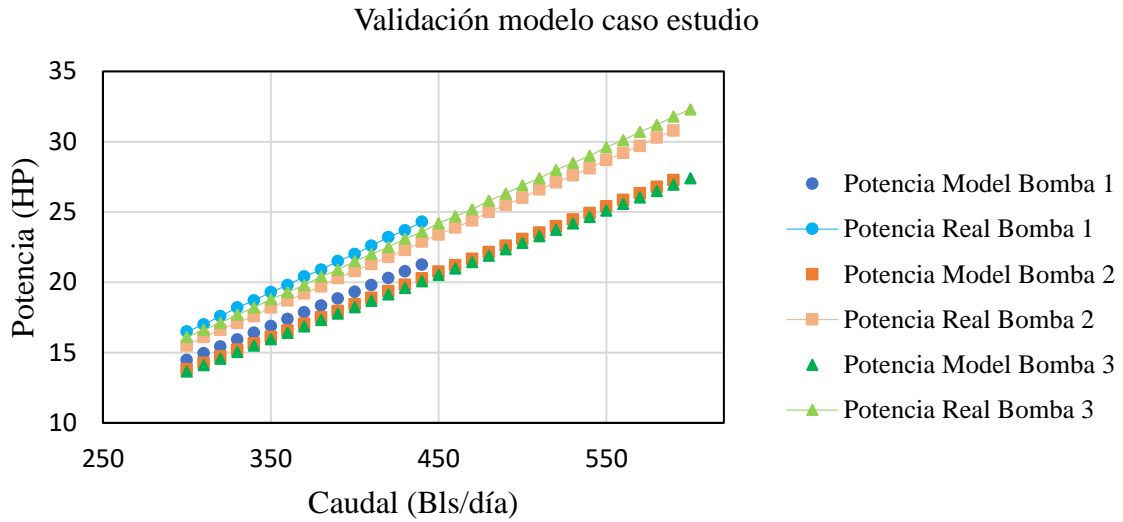
Manejo de datos para el caso estudio.



Posteriormente, se realiza la gráfica de Potencia vs caudal en la que se establecen los datos de los tres tipos de bomba como se muestra en la figura 10. Comparando los resultados obtenidos en la aplicación del modelo con los datos del diseño de pozo (software) para cada caso.

Figura 10.

Validación modelo caso estudio.



De esta forma, se realiza la validación del modelo, evidenciando que el modelo tiene la misma tendencia de comportamiento de los datos obtenidos del software comercial con un % de error menor al 15,08% para las bombas seleccionadas, como se muestra a continuación

Caso estudio			
	Bomba 1	Bomba 2	Bomba 3
% Error	12,35%	11,34%	15,08%

Por lo cual se procede a aplicar el modelo en los casos propuestos en el siguiente capítulo.

6. Aplicación del modelo matemático para determinar impactos energéticos

Para la aplicación del modelo se seleccionaron 5 casos de estudio (Pozo 1, Pozo 2, Pozo 3, Pozo 4 y Pozo 5) ubicados en el mismo sector de un campo colombiano, con características similares operacionales y del fluido. A continuación, se presenta la aplicación del modelo matemático llevada a cabo en el Pozo 1.

6.1 Aplicación del modelo al Pozo 1

El modelo matemático fue aplicado al Pozo 1 implementando las restricciones en el caudal de 300 a 600 Bls/día y un rango de velocidad de 80 a 180 RPM. Las características y condiciones operacionales del Pozo 1 para su respectivo diseño se presentan en la figura 11.

Figura 11.

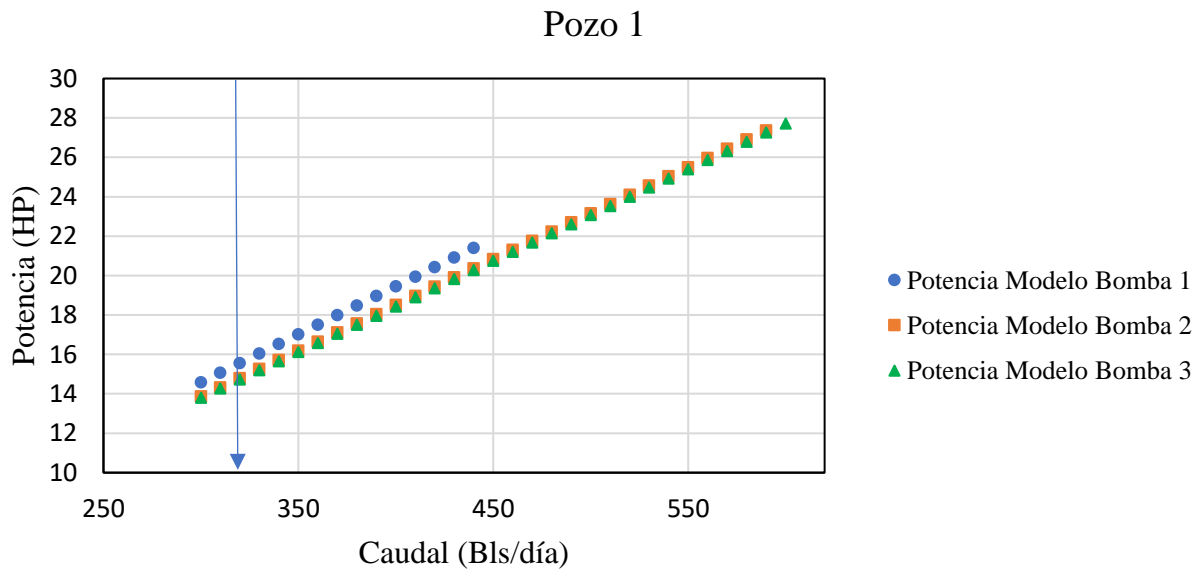
Información de diseño para el Pozo 1.

INFORMACIÓN DE POZO		PROPIEDADES DEL FLUIDO	
Casing	7" P-110, 29 lbs/ft	API	21°
Tubing	3.5" 9.3 lbs/ft	Salinidad del agua	4000 ppm
Varillas	970N 1-1/8"	Gravedad específica del gas	0.7
Perforados	3613 ft	GOR	50 scf/STB
Prof asent bomba	2960 ft	BS&W	91%
DATOS DE PRODUCCIÓN		PARÁMETROS DE DISEÑO	
Producción estimada	600 Bls/día	Velocidad máxima	180 RPM
Corte de agua	96%	Eficiencia de la bomba	60%
Sumergencia	200 ft	Eficiencia del cabezal	95%
THP	90 psi	Eficiencia de las correas	97%
CHP	0 psi	Max carga de presión bomba	80%
		Costo de energía	0.14 USD/kWh

A cada caso de estudio se le aplica lo mencionado en el capítulo 4 del presente trabajo, donde se determina la potencia requerida por el sistema para cada tipo de bomba. Debido a las características de cada bomba se identifica la potencia mínima común entre las tres bombas por medio de una línea base, como se muestra en la figura 12.

Figura 12.

Potencia vs caudal para el Pozo 1.



De igual forma, mediante una macro de Excel, se establece el caudal de producción mínimo que es común en las tres bombas, con un valor de 300 Bls/día como se muestra en la tabla 5. Este caudal es tomado como base para determinar la potencia requerida por tres bombas en la obtención de dicho caudal, el valor con menor requerimiento de potencia es tomado como referencia y contrastado con el requerimiento de potencia de las dos bombas restantes al mismo valor de caudal, como se muestra en tabla 6.

Tabla 5.

Potencia de bombas del Pozo 1.

PRODUCCIÓN (Bls/día)	300
Potencia BOMBA 1 (HP)	14,57
Potencia BOMBA 2 (HP)	13,86
Potencia BOMBA 3 (HP)	13,8
POTENCIA MINIMA (HP)	13,8
BOMBA SELECCIONADA	Bomba 3

Tabla 6.

Potencia y caudal de bombas Pozo 1.

Bomba 1		Bomba 2		Bomba 3	
Q	Potencia	Q	Potencia	Q	Potencia
284	13,8	298,9	13,8	300,2	13,8
300	14,57	300	13,85	300	13,8

Seguidamente, para las bombas restantes (1 y 2) se determina qué diferencia de potencia “dp energético” existe para lograr obtener el caudal base y se determina el porcentaje de eficiencia energética (de la bomba 3 con respecto a las bombas 1 y 2) como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7.

Eficiencia energética de las bombas para el Pozo 1.

Bomba	1	2
dp energético (HP)	0,77	0,05
% Ef energética	6%	0,4%

Abordando los costos energéticos, a partir de la potencia requerida por cada bomba, se determina su consumo energético con sus respectivos costos por hora y costos anuales, como se evidencia en la tabla 8.

Tabla 8.

Consumo energético para el Pozo 1.

	(HP)	kW	kWh	kWh - año	USD	USD - año
Potencia BOMBA 1	14,6	10,9	260,7	95162,7	36,5	13322,8
Potencia BOMBA 2	13,9	10,3	248,0	90529,8	34,7	12674,2
Potencia BOMBA 3	13,8	10,3	247,0	90147,4	34,6	12620,6

De esta manera, es posible determinar el ahorro en cuanto a costos de energía entre las diferentes bombas, como se plantea en la tabla 9.

Tabla 9.

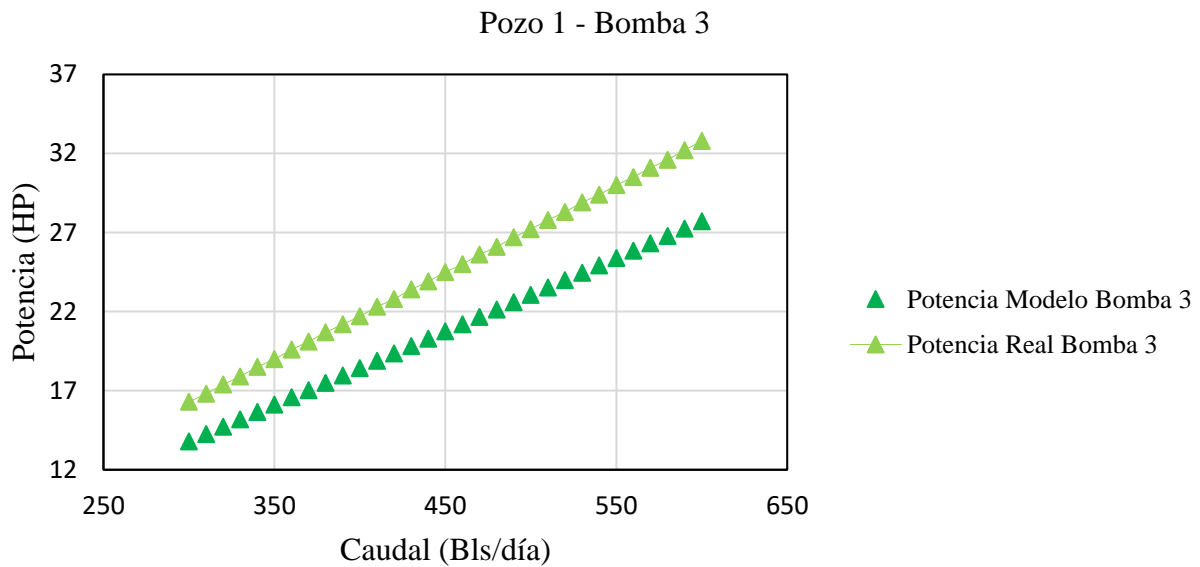
Ahorro en costo y consumo energético para el Pozo 1.

Bombas	Diferencia		Diferencia	
	1	3	2	3
Consumo (kWh-año)	5015,3		382,4	
USD - año	702,1		53,5	

La bomba que presenta menor requerimiento energético es la bomba 3, de tal manera que, se realiza la comparación entre la potencia calculada por el modelo y la potencia real (software) para la bomba 3, como se muestra en la figura 13 obteniendo un error promedio de 15,29%.

Figura 13.

Potencia vs Caudal de la bomba seleccionada para el Pozo 1.



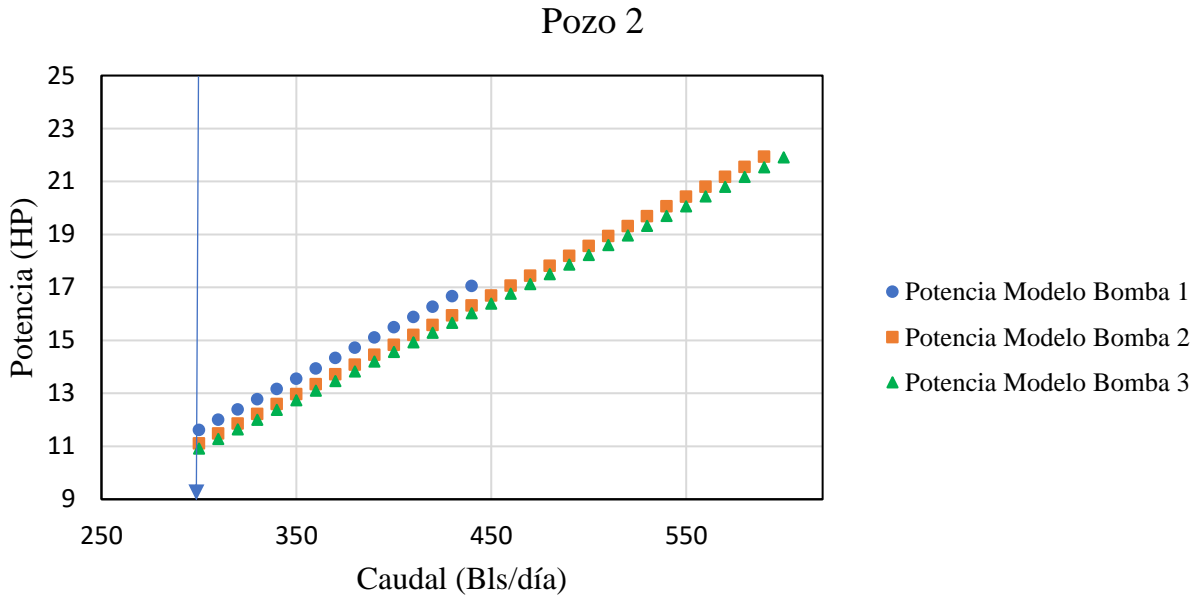
El proceso llevado a cabo hasta el momento detalla la bomba más eficiente energéticamente para el Pozo 1 de acuerdo con sus características y consumo energético. Este proceso es implementado en los demás casos estudio, es decir, en 4 pozos más de este campo como se muestra a continuación.

6.2 Aplicación del modelo al Pozo 2

El modelo matemático fue aplicado al Pozo 2 con una profundidad de asentamiento de la bomba de 3781 ft, un punto medio de perforados de 4281 ft, CHP de 60 psi y THP de 90 psi. Este pozo presenta las mismas condiciones operativas del Pozo 1. La representación gráfica del valor de potencia determinado por el modelo para las tres bombas se presenta en la figura 14.

Figura 14.

Potencia vs caudal para el Pozo 2.



Seguidamente, en la tabla 10 se selecciona la bomba con menor requerimiento energético y se calculan los puntos de potencia requerida para las bombas restantes, como se muestra en la tabla 11.

Tabla 10.

Potencia de bombas del Pozo 2.

PRODUCCIÓN (Bls/día)	300
Potencia BOMBA 1 (HP)	11,61
Potencia BOMBA 2 (HP)	11,11
Potencia BOMBA 3 (HP)	10,91
POTENCIA MINIMA (HP)	10,91
BOMBA SELECCIONADA	Bomba 3

Tabla 11.

Potencia y caudal de bombas Pozo 2.

Bomba 1		Bomba 2		Bomba 3	
Q	Potencia	Q	Potencia	Q	Potencia
282	10,91	294,9	10,91	300	10,91
300	11,61	300	11,10	300	10,91

Posteriormente, se determina la eficiencia energética de la bomba 3 con respecto a la bomba 1 y la bomba 2 como se muestra a continuación.

Tabla 12.

Eficiencia energética de las bombas para el Pozo 2.

Bomba	1	2
dp energético (HP)	0,70	0,19
% Ef energética	6%	1,8%

Abordando los costos energéticos, a partir de la potencia requerida por cada bomba, se determina su consumo energético con sus respectivos costos por hora y costos anuales, como se evidencia en la tabla 13.

Tabla 13.

Consumo energético para el Pozo 2.

	(HP)	kW	kWh	kWh - año	USD	USD - año
Potencia BOMBA 1	14.6	10.9	260.7	95162.7	36.5	13322.8
Potencia BOMBA 2	13.9	10.3	248.0	90529.8	34.7	12674.2
Potencia BOMBA 3	13.8	10.3	247.0	90147.4	34.6	12620.6

De esta manera, es posible determinar el ahorro en costos de energía entre las diferentes bombas, como se plantea en la tabla 14

Tabla 14.

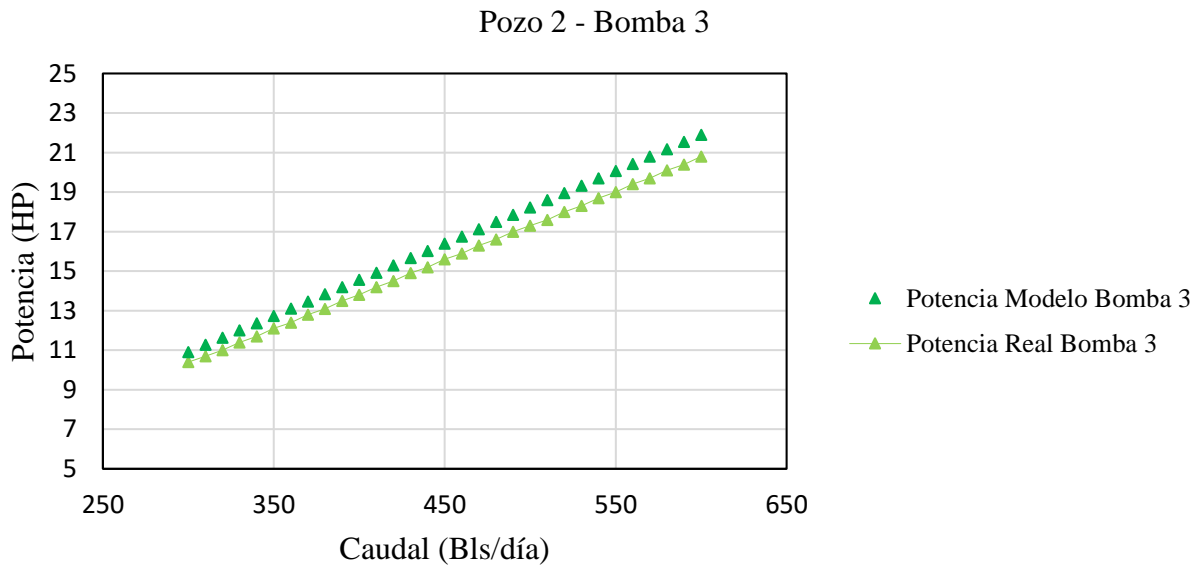
Ahorro en costo y consumo energético para el Pozo 2.

Bombas	Diferencia		Diferencia	
	1	3	2	3
Consumo (kWh-año)	4565,9		1293,4	
USD - año	639,2		181,1	

La bomba que presenta menor requerimiento energético es la bomba 3, de tal manera que, se realiza la comparación entre la potencia calculada por el modelo y la potencia real (software) para la bomba 3, como se muestra en la figura 15, obteniendo un error promedio de 5,38%.

Figura 15.

Potencia vs Caudal de la bomba seleccionada para el Pozo 2.

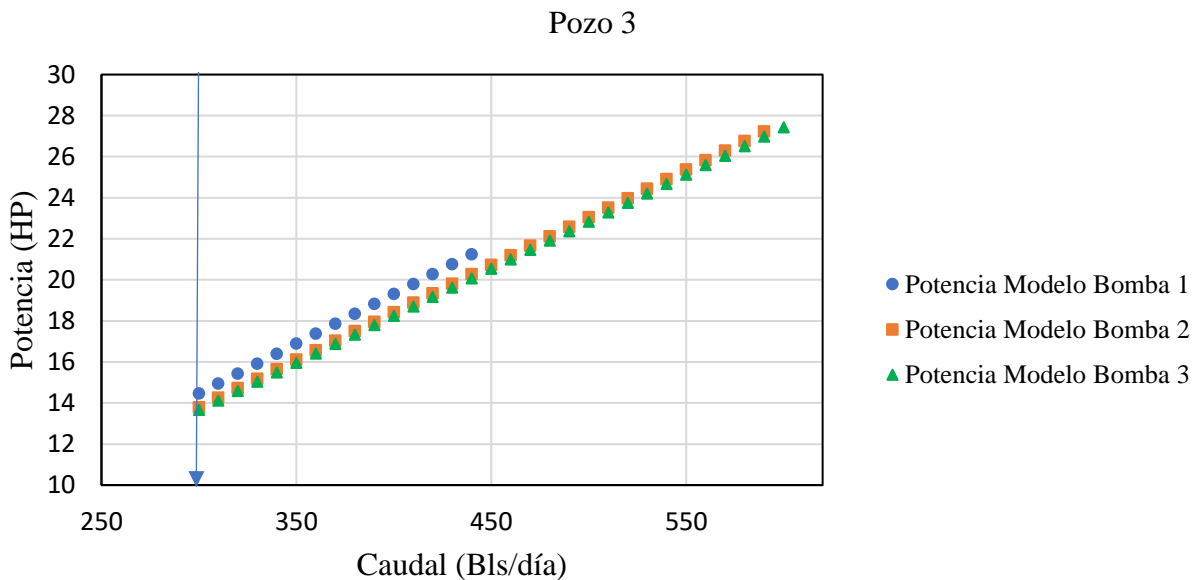


6.3 Aplicación del modelo al Pozo 3

El modelo matemático fue aplicado al Pozo 3 con una profundidad de asentamiento de la bomba de 2960 ft, un punto medio de perforados de 3613 ft, CHP de 0 psi, THP de 90 psi y GOR de 20 scf/STB. Este pozo presenta las mismas condiciones operativas del Pozo 1. A continuación se presenta la gráfica de la potencia determinada por el modelo vs caudal en la figura 16.

Figura 16.

Potencia vs caudal para el Pozo 3.



Seguidamente, en la tabla 15 se selecciona la bomba con menor requerimiento energético y se calculan los puntos de potencia requerida para las bombas restantes, como se muestra en la tabla 16.

Tabla 15.

Potencia de bombas del Pozo 3.

PRODUCCIÓN (Bls/día)	300
Potencia BOMBA 1 (HP)	14,5
Potencia BOMBA 2 (HP)	13,8
Potencia BOMBA 3 (HP)	13,7
POTENCIA MINIMA (HP)	13,7
BOMBA SELECCIONADA	Bomba 3

Tabla 16.

Potencia y caudal de bombas Pozo 3.

Bomba 1		Bomba 2		Bomba 3	
Q	Potencia	Q	Potencia	Q	Potencia
284	13,7	297,3	13,7	300	13,7
300	14,5	300	13,8	300	13,7

Posteriormente, se determina la eficiencia energética de la bomba 3 con respecto a la bomba 1 y la bomba 2.

Tabla 17.

Eficiencia energética de las bombas para el Pozo 3.

Bomba	1	2
dp energético (HP)	0,79	0,12
% Ef energética	6%	0,9%

Abordando los costos energéticos, a partir de la potencia requerida por cada bomba, se determina su consumo energético con sus respectivos costos por hora y costos anuales, como se evidencia en la tabla 18.

Tabla 18.

Consumo energético para el Pozo 3.

	(HP)	kW	kWh	kWh - año	USD	USD - año
Potencia BOMBA 1	14,5	10,8	258,8	94456,6	36,2	13223,9
Potencia BOMBA 2	13,8	10,3	246,8	90095,0	34,6	12613,3
Potencia BOMBA 3	13,7	10,2	244,5	89249,2	34,2	12494,9

De esta manera, es posible determinar el ahorro en costos de energía entre las diferentes bombas, como se plantea en la tabla 19.

Tabla 19.

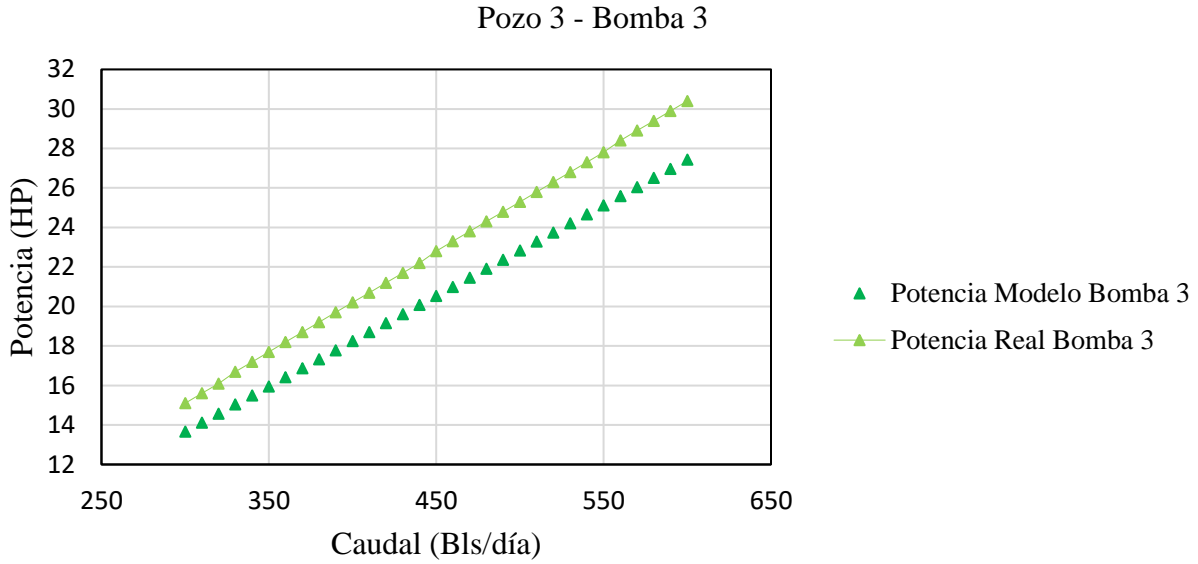
Ahorro en costo y consumo energético para el Pozo 3.

Bombas	Diferencia		Diferencia	
	1	3	2	3
Consumo (kWh-año)	5207,4		845,7	
USD - año	729,0		118,4	

La bomba que presenta menor requerimiento energético es la bomba 3, de tal manera que, se realiza la comparación entre la potencia calculada por el modelo y la potencia real (software) para la bomba 3, como se muestra en la figura 17. Obteniendo un error promedio de 9,75%.

Figura 17.

Potencia vs Caudal de la bomba seleccionada para el Pozo 3.

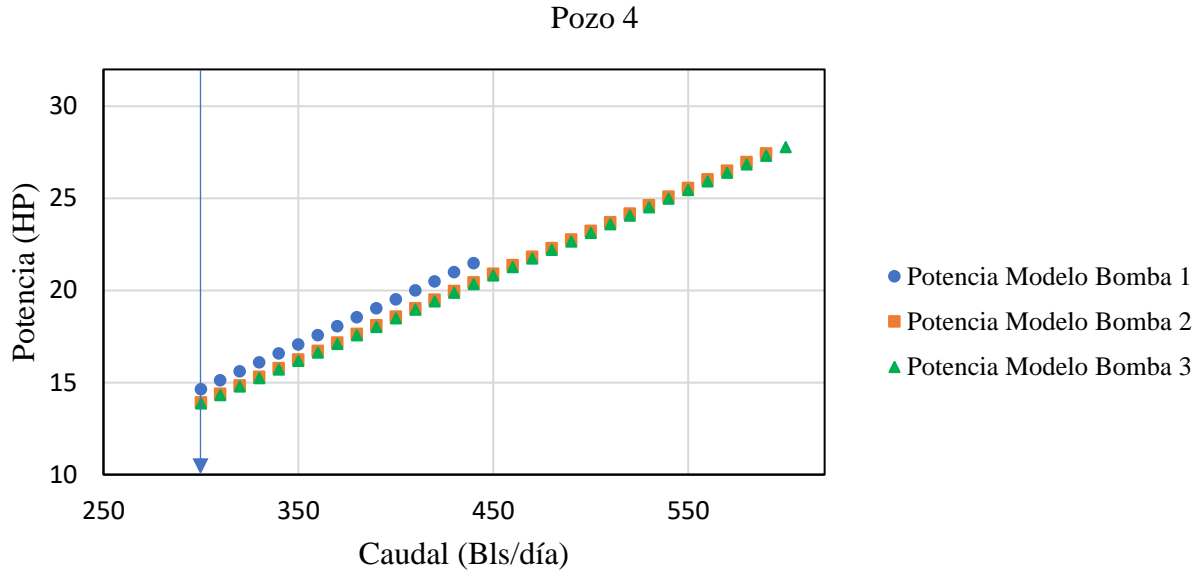


6.4 Aplicación del modelo al Pozo 4

El modelo matemático fue aplicado al Pozo 4 con una profundidad de asentamiento de la bomba de 2910 ft, un punto medio de perforados de 3218 ft, CHP de 0 psi y THP de 90 psi. Este pozo presenta las mismas condiciones operativas del Pozo 1. La gráfica de la potencia determinada por el modelo vs caudal se muestra en la figura 18

Figura 18.

Potencia vs caudal para el Pozo 4.



Seguidamente, en la tabla 20 se selecciona la bomba con menor requerimiento energético y se calculan los puntos de potencia requerida para las bombas, como se muestra en la tabla 21.

Tabla 20.

Potencia de bombas del Pozo 4.

PRODUCCIÓN (Bls/día)	300
Potencia BOMBA 1 (HP)	14,6
Potencia BOMBA 2 (HP)	13,91
Potencia BOMBA 3 (HP)	13,85
POTENCIA MINIMA (HP)	13,85
BOMBA SELECCIONADA	Bomba 3

Tabla 21.

Potencia y caudal de bombas Pozo 4.

Bomba 1		Bomba 2		Bomba 3	
Q	Potencia	Q	Potencia	Q	Potencia
284	13,85	298,8	13,85	300	13,85
300	14,62	300	13,91	300	13,85

Posteriormente, se determina la eficiencia energética de la bomba 3 con respecto a la bomba 1 y la bomba 2.

Tabla 22.

Eficiencia energética de las bombas para el Pozo 4.

Bomba	1	2
dp energético (HP)	0,77	0,054
% Ef energética	6%	0,4%

Abordando los costos energéticos, a partir de la potencia requerida por cada bomba, se determina su consumo energético con sus respectivos costos por hora y costos anuales, como se evidencia en la tabla 23.

Tabla 23.

Consumo energético para el Pozo 4.

	(HP)	kW	kWh	kWh - año	USD	USD - año
Potencia BOMBA 1	14.6	10,9	261,7	95531,8	36,6	13374,5
Potencia BOMBA 2	13,9	10,4	249,0	90892,2	34,9	12724,9
Potencia BOMBA 3	13,9	10,3	247,9	90500,3	34,7	12670

De esta manera, es posible determinar el ahorro en costos de energía entre las diferentes bombas, como se plantea en tabla 24.

Tabla 24

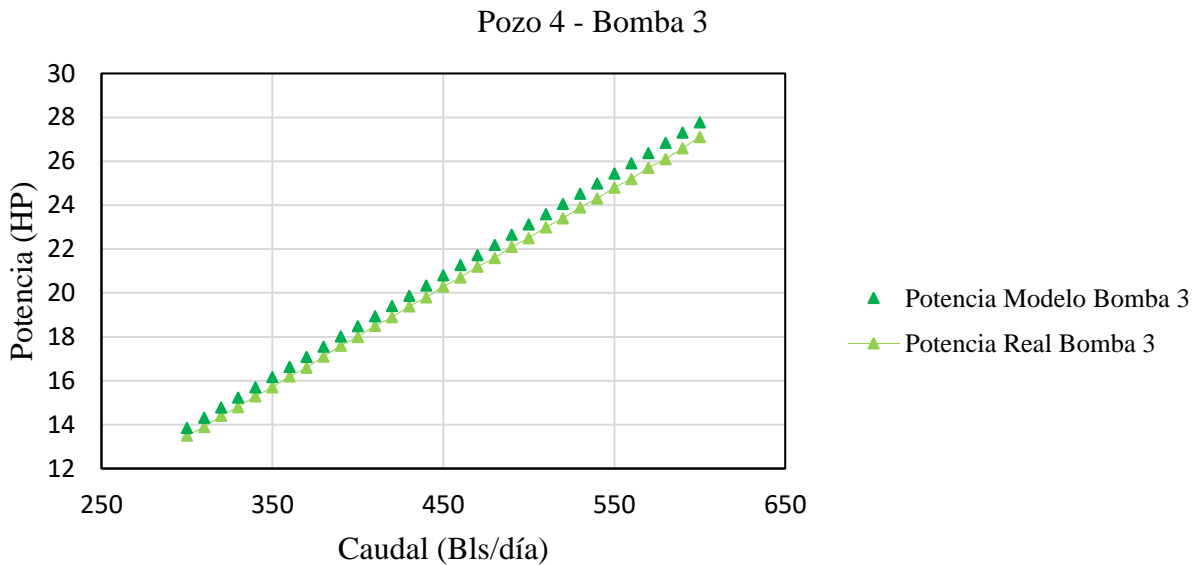
Ahorro en costo y consumo energético para el Pozo 4.

Bombas	Diferencia		Diferencia	
	1	3	2	3
Consumo (kWh-año)	4639,6		5031,5	
USD - año	649,5		704,4	

La bomba que presenta menor requerimiento energético es la bomba 3, de tal manera que, se realiza la comparación entre la potencia calculada por el modelo y la potencia real (software) para la bomba 3, como se muestra en la figura 18. Obteniendo un error promedio de 2,69%.

Figura 19.

Potencia vs Caudal de la bomba seleccionada para el Pozo 4.

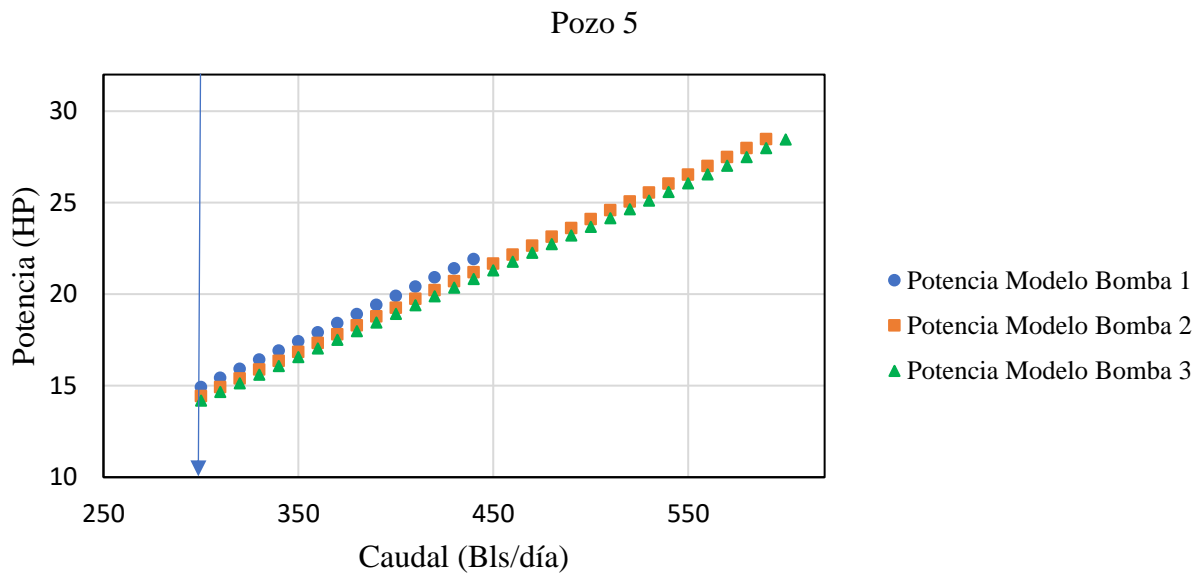


6.5 Aplicación del modelo al Pozo 5

El modelo matemático fue aplicado al Pozo 5 con una profundidad de asentamiento de la bomba de 3448 ft, un punto medio de perforados de 4055 ft, CHP de 0 psi y THP de 50 psi. Este pozo presenta las mismas condiciones operativas del Pozo 1. La representación gráfica de la potencia determinada por el modelo vs caudal se muestra en la figura 20.

Figura 20.

Potencia vs caudal para el Pozo 5.



Seguidamente, en la tabla 25 Se selecciona la bomba con menor requerimiento energético y se calculan los puntos de potencia requerida para las bombas restantes, como se muestra en la tabla 36.

Tabla 25.

Potencia de bombas del Pozo 5.

PRODUCCIÓN (Bls/día)	300
Potencia BOMBA 1 (HP)	14,92
Potencia BOMBA 2 (HP)	14,43
Potencia BOMBA 3 (HP)	14,18
POTENCIA MINIMA (HP)	14,18
BOMBA SELECCIONADA	Bomba 3

Tabla 26.

Potencia y caudal de bombas Pozo 5.

Bomba 1		Bomba 2		Bomba 3	
Q	Potencia	Q	Potencia	Q	Potencia
285	14,18	295,1	14,18	300	14,18
300	14,92	300	14,43	300	14,18

Posteriormente, se determina la eficiencia energética de la bomba 3 con respecto a la bomba 1 y la bomba 2.

Tabla 27.

Eficiencia energética de las bombas para el Pozo 5.

Bomba	1	2
dp energético (HP)	0,73	0,24
% Ef energética	5%	1,7%

Abordando los costos energéticos, a partir de la potencia requerida por cada bomba, se determina su consumo energético con sus respectivos costos por hora y costos anuales, como se evidencia en la tabla 28.

Tabla 28.

Consumo energético para el Pozo 5.

	(HP)	kW	kWh	kWh - año	USD	USD - año
Potencia BOMBA 1	14,9	11,1	267,0	97441,5	37,4	13641,8
Potencia BOMBA 2	14,4	10,8	258,2	94250,0	36,2	13195
Potencia BOMBA 3	14,2	10,6	253,8	92649,4	35,5	12970,9

De esta manera, es posible determinar el ahorro en costos de energía entre las diferentes bombas, como se plantea en tabla 29.

Tabla 29.

Ahorro en costo y consumo energético para el Pozo 5.

Bombas	Diferencia		Diferencia	
	1	3	2	3
Consumo (kWh-año)	4792,1		1600,6	
USD - año	670,9		224,1	

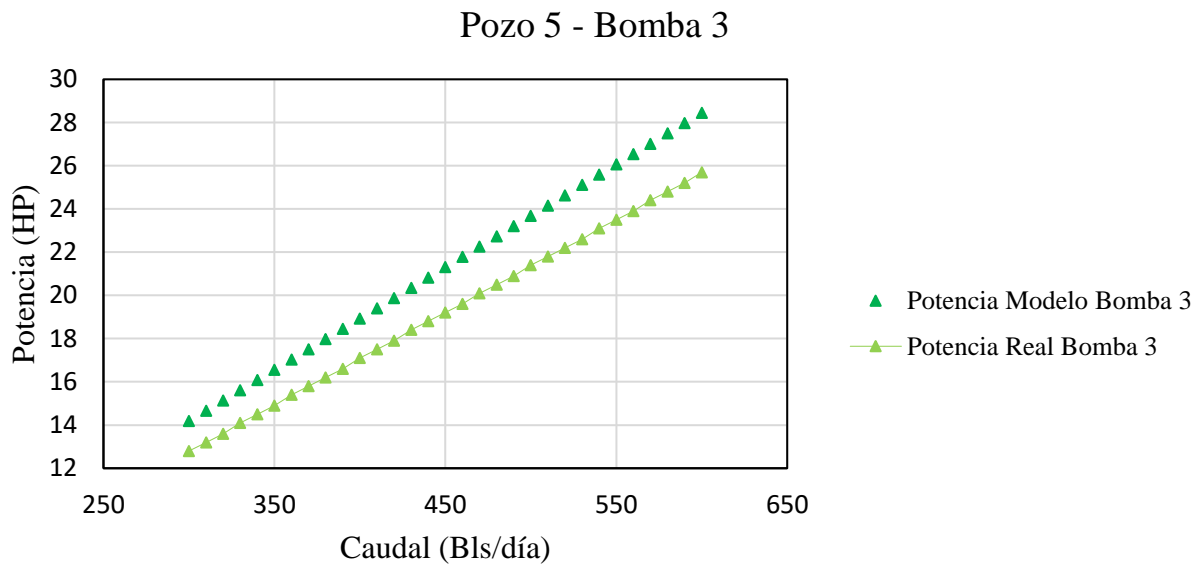
La diferencia radica en el ahorro de consumo y de costos si se escoge la bomba 3 con respecto a las bombas 1 y 2.

Asimismo, la bomba que presenta menor requerimiento energético es la bomba 3, de tal manera que, se realiza la comparación entre la potencia calculada por el modelo y la potencia real

(software) para la bomba 3, como se muestra en la figura 21, con un porcentaje de error promedio de 10,88%.

Figura 21.

Potencia vs Caudal de la bomba seleccionada para el Pozo 5.



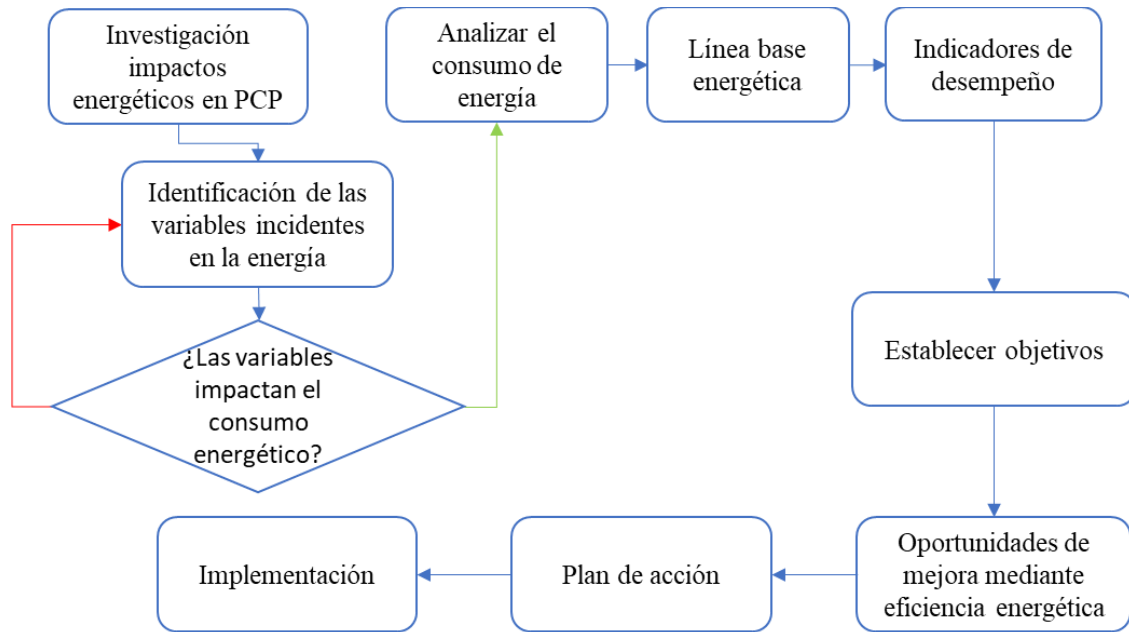
7. Oportunidades de mejora en el sistema de bombeo por cavidades progresivas

En el planteamiento de las oportunidades de mejora se considera la aplicación de un sistema de gestión de la energía como se menciona en la norma ISO 50001, el cual consiste en la implementación de herramientas estadísticas para la mejora de la eficiencia energética en un proceso productivo, García-León et al., (2019). Este trabajo se enfoca en la planificación energética, Howell, (2014) donde se establecen objetivos y planes de acción para alcanzar metas

energéticas enfocados en la determinación de impactos energéticos para sistemas de bombeo por cavidades progresivas como se presenta a continuación en la figura 22.

Figura 22.

Planificación energética - oportunidades de mejora.



Nota: modificado de Howell, M. T. (2014). Effective implementation of an ISO 50001 energy management system (EnMS). Milwaukee ASQ Quality Press.

El proceso parte de un esquema de aplicación que consiste en: determinación de impactos energéticos, línea base energética, selección de indicadores de desempeño, identificación de objetivos, planteamiento de posibles oportunidades de mejora con un plan de acción energético, donde:

- Determinación de impactos energéticos: se inicia con un análisis de las variables posibles incidentes en la potencia requerida por el sistema, analizando el consumo energético general, todo esto desarrollado en la presente investigación.

- Línea base energética: es desarrollada mediante el modelo matemático propuesto, ya que, como se menciona en el ítem 3,8 de la norma ISO 50001 es la “referencia cuantitativa que proporciona la base para la comparación del desempeño energético”.

- Selección de indicadores de desempeño: según la norma ISO 50001 en el ítem 3.4.4, es la “medida o unidad de desempeño energético” se involucra el desempeño de cada una de las bombas disponibles para el sector del campo petrolero, detallando los indicadores de la siguiente forma:

Diferencial de potencia $DP = (Pot_{Qref} - Pot_{basemin})$

Consumo energético anual $CEA = 6532,3 * Pot_{reqbomba}$

Costo anual de energía $CA = CEA * costo\ de\ energía$

- Identificación de objetivos: basados en los indicadores de desempeño propuestos se plantean como objetivos: conocer el diferencial de potencia entre las bombas analizadas, determinar el consumo energético anual para lograr trabajar con el mínimo posible y reducir el costo anual de energía al implementar la bomba adecuada para cada caso.

- Plan de acción y oportunidades de mejora: hacer uso del modelo propuesto en el presente trabajo para determinar la diferencia de potencia existente entre el requerimiento de las bombas antes de su implementación en pozo y su respectivo consumo energético; desarrollar un esquema que permita verificar a largo plazo la viabilidad de selección de las bombas y otros componentes del sistema desde el ámbito energético u operacional; plantear una metodología que permita realizar un análisis financiero de la aplicación de los componentes del sistema seleccionados por la eficiencia energética y generar más modelos que impliquen casos de estudio de otros campos de petróleo con diferentes características.

Para lograr un primer paso en este cambio hacia el punto de vista energético hay que tener algunas consideraciones finales, como lo son: Implementar el monitoreo periódico en cada pozo para concretar los datos reales de cada caso y verificar cambios en el requerimiento energético del sistema dado por incidencias; conformar equipos de trabajo encargados de revisar y actuar ante posibles alternativas energéticas y fortalecer el ámbito energético en los sistemas de levantamiento artificial para generar conciencia del uso de la energía.

8. Análisis de resultados

En el presente trabajo se llevó a cabo una determinación de impactos energéticos en el sistema de bombeo por cavidades progresivas mediante un modelo matemático propuesto que detalla la potencia requerida para cada caso estudio y un software comercial especial para el diseño del sistema de levantamiento artificial.

Al analizar el diseño del sistema de bombeo por cavidades progresivas se estudiaron las ecuaciones de diseño del sistema con el objetivo de evidenciar las variables incidentes en el ámbito energético del sistema. Posteriormente, se procedió a realizar un análisis de sensibilidad estableciendo los coeficientes de correlación de 4 variables, en el cual la variable se pudo evidenciar que para el caso estudio en el ítem 3.1 la variable más incidente en la potencia requerida por el sistema es la velocidad.

La validación del modelo evidencia un ajuste con los datos reales de 12,35%, 11,34% y 15,08%, para la bomba 1, bomba 2 y bomba 3, respectivamente. Continuando con la aplicación

del modelo, se seleccionaron 5 pozos de un mismo sector de un campo colombiano de los cuales se contó con toda la información requerida para realizar el diseño de cada caso en el software de diseño de PCP y contrastarlo con el modelo propuesto.

En los casos estudiados, el modelo propuesto presenta porcentajes de error en el rango de 2,72% y 15,29%, tal como se muestra en la tabla 30.

Tabla 30.

Porcentajes de error promedio de los pozos.

		POZOS		
		Bomba 1	Bomba 2	Bomba 3
Pozo 1	% Error	15,25%	14,25%	15,29%
Pozo 2	% Error	5,35%	6,52%	5,38%
Pozo 3	% Error	9,29%	8,21%	9,75%
Pozo 4	% Error	2,72%	3,91%	2,69%
Pozo 5	% Error	11,41%	12,82%	10,88%

El modelo presenta un menor porcentaje de error para el Pozo 4 y el mayor porcentaje de error en el Pozo 1.

Además, se logra evidenciar que para el Pozo 2, Pozo 4 y Pozo 5, el valor calculado de potencia por el modelo es mayor que el valor de potencia real, por el contrario, en el Pozo 1 y el Pozo 3, los valores de potencia calculados por el modelo son menores a los valores de potencia real, como se evidencia el proceso llevado a cabo en el Apéndice C.

Al realizar el análisis en el ámbito energético, en todos los pozos se obtienen resultados de mayor eficiencia energética para la bomba 3, debido a que, es la de menor requerimiento de

potencia para cada pozo con porcentajes de eficiencia entre 0,36% y 6,4%, como se muestra en la tabla 31.

Tabla 31.

Eficiencia energética de los pozos.

POZOS			
		Bomba 3-1	Bomba 3-2
Pozo 1	% Ef energética	5.56%	0.36%
Pozo 2	% Ef energética	6.40%	1.76%
Pozo 3	% Ef energética	5.81%	0.91%
Pozo 4	% Ef energética	5.55%	0.39%
Pozo 5	% Ef energética	5.17%	1.68%

Con base en el análisis de eficiencia energética se procede a comparar la aplicación del modelo para la bomba 3 con los datos reales, obteniendo porcentajes de error que varían entre 2,69% y 15,29%. Asimismo, la bomba 3 tiene un mayor acercamiento a las condiciones reales para el Pozo 2 y el Pozo 4, como se muestra en la tabla 32.

Tabla 32.

Porcentajes de error de las bombas seleccionadas.

Bomba 3	
	% Error
Pozo 1	15,29%
Pozo 2	5,38%
Pozo 3	9,75%
Pozo 4	2,69%
Pozo 5	10,88%

Teniendo en cuenta el consumo energético de cada bomba seleccionada, en la tabla 33 se presenta la diferencia de consumo entre la bomba seleccionada y las bombas restantes en cada pozo.

Tabla 33.

Ahorro en consumo energético de los pozos.

		Relación de bombas		Relación de bombas	
		1	3	2	3
Pozo 1	Consumo (kWh-año)	5015,3		382,4	
	USD - año	702,1		53,5	
Pozo 2	Consumo (kWh-año)	4565,9		1293,4	
	USD - año	639,2		181,1	
Pozo 3	Consumo (kWh-año)	5207,4		845,7	
	USD - año	729		118,4	
Pozo 4	Consumo (kWh-año)	5031,5		391,9	
	USD - año	704,4		54,9	
Pozo 5	Consumo (kWh-año)	4792,1		1600,6	
	USD - año	670,9		224,1	

Se evidencia un ahorro de consumo energético entre 382.4 kWh-año y 5207.4 kWh-año, de igual forma, se presenta un ahorro económico entre 53,5 USD – año y 729 USD – año, como se muestra en la tabla 33.

Considerando el consumo energético de las bombas seleccionadas en los casos estudiados como se muestra en la tabla 34, la aplicación de la bomba 3 en el Pozo 5 es la que presenta mayor consumo energético con respecto a los demás pozos, por ende, es la que presenta mayores costos de energía.

Tabla 34.

Costos por consumo energético en los pozos.

		kWh - año	USD - año
Pozo 1	Consumo energético Bomba 3	90147.4	12620.6
Pozo 2	Consumo energético Bomba 3	71275.4	9978.6
Pozo 3	Consumo energético Bomba 3	89249.2	12494.9
Pozo 4	Consumo energético Bomba 3	90500.3	12670.0
Pozo 5	Consumo energético Bomba 3	92649.4	12970.9

Se evidencia que, en la aplicación del modelo en los 5 pozos estudiados, la bomba más eficiente energéticamente con respecto a las bombas restantes en cada pozo es la bomba 3, ya que, es la que presenta menor requerimiento energético, por ende, se plantea como oportunidad de mejora, la selección y aplicación de la bomba 3 en los casos detallados.

9. Conclusiones

La determinación de impactos energéticos en el sistema de bombeo por cavidades progresivas es presentada mediante un modelo matemático de programación lineal conforme al diseño del sistema de levantamiento artificial.

Las variables seleccionadas para el planteamiento del análisis de sensibilidad fueron tomadas de las variables operacionales (que se pueden manipular y trabajar en ciertos rangos en campo) mediante la determinación de la ponderación del coeficiente de correlación, siendo la velocidad la variable con mayor impacto energético en el sistema.

El modelo matemático propuesto determina impactos energéticos en el sistema de bombeo por cavidades progresivas mediante la potencia requerida por el sistema para cada escenario planteado (cada bomba para cada pozo manteniendo las restricciones operativas y del modelo) relacionándolo directamente con la velocidad de operación, ya que para modo de este estudio tuvo relevancia en el ámbito energético.

El modelo matemático es aplicado a cinco (5) pozos de un mismo sector de un campo colombiano debido a que, estos pozos presentan alto porcentaje de contenido de arena y sólidos (BS&W), el histórico del campo y lecciones aprendidas indican antecedentes de implementación de sistemas PCP, además, este sistema es especial para el manejo de sólidos.

Estos pozos poseen características similares operacionales y del fluido, donde el modelo presenta porcentajes de error de 15,29%, 5,38%, 9,75%, 2,69% y 10,88%, para el Pozo 1, Pozo 2, Pozo 3, Pozo 4 y Pozo 5, contrastado con los datos reales de dichos pozos. La variación en los porcentajes de error se obtiene del cambio en las variables de cada pozo, tales como: BS&W, salinidad del agua, profundidades (PMP y Profundidad de asentamiento de la bomba), GOR, THP y CHP.

El potencial de producción que ofrece cada pozo hace que sea un parámetro principal al momento de seleccionar sus componentes. En el caso de la bomba a implementar se contemplan los rangos de operación de velocidad, el caudal que se estima de cada pozo, todo esto para escoger la bomba adecuada. Cada bomba posee su propia capacidad de desplazamiento, tres tipos de bomba se implementaron para cada pozo debido a, en primera instancia, la disponibilidad en campo y sus capacidades, de desplazamiento y levantamiento, respectivamente.

Mediante el cálculo de eficiencia energética aplicada en los casos estudiados, se evidencia que para cada caso se puede plantear una oportunidad de mejora en la selección de la bomba más

eficiente energéticamente, haciendo uso del modelo propuesto, que para modo de este estudio la bomba 3 es la que presenta menor requerimiento de potencia para todos los pozos. Esto permite conocer el diferencial de potencia entre las bombas analizadas, determinar el consumo energético anual para lograr trabajar con el mínimo posible y reducir el costo anual de energía al implementar la bomba adecuada para cada caso.

10. Recomendaciones

Construidas sobre los resultados obtenidos en la ejecución del proyecto:

Implementar el modelo propuesto en el presente trabajo para determinar la diferencia de potencia existente entre el requerimiento de las bombas antes de su implementación en pozo y su respectivo consumo energético.

Plantear una metodología que permita realizar un análisis financiero de la aplicación de los componentes del sistema, especialmente en las bombas seleccionadas por su eficiencia energética, como se indica en el modelo propuesto, con proyección a futuro para que pueda ser implementado a gran escala en campo acorde con la viabilidad económica.

Al momento de realizar el planteamiento de los escenarios de simulación, se debe considerar la capacidad del motor en función de la profundidad de asentamiento de la bomba y velocidad, para lograr el correcto diseño del sistema.

Plantear más sensibilizaciones que involucren variables adicionales: torque, profundidades, nivel de fluido, sumergencia, temperatura de fondo; ya que, las analizadas en el

presente trabajo fueron: velocidad, configuración del motor, presión en fondo y profundidad de asentamiento de la bomba. Todo esto para contemplar el impacto energético que podrían tener en el sistema de levantamiento artificial.

Continuación de la presente investigación:

Implementar el modelo en otros campos petroleros que cuenten con las consideraciones del modelo para su aplicación detalladas en el ítem 4.1 de la presente investigación.

Continuar la presente investigación en estudio a profundidad de otros componentes del sistema de bombeo por cavidades progresivas (cabezales, varillas, casing, tubing, accesorios) con el objetivo de contribuir al consumo del menor requerimiento energético, contemplando que en la presente investigación se tuvo en cuenta el estudio de tres tipos de bomba para cada pozo.

En futuras investigaciones es posible realizar un análisis energético del sistema de levantamiento artificial contemplando las pérdidas de energía traducidas en términos de potencia a través del sistema partiendo de un análisis principal implementado en el presente trabajo.

Referencias Bibliográficas

- Abounaima, M. C., El mazouri, F. Z., Lamrini, L., Nfissi, N., El makhfi, N., & Ouzarf, M. (2020). The pearson correlation coefficient applied to compare multi-criteria methods case the ranking problematic.
- Aceros, M., Acevedo, C., Calderón, Z. (2018). *Prospectiva energética Colombia 2050*. Bucaramanga, Colombia. Universidad Industrial de Santander.
- Agencia de sostenibilidad energética. (2011). *Guía de implementación de sistemas de gestión de energía basados en ISO 50001. Sistemas de gestión de la energía basados en la ISO 50001*. <https://www.guiaiso50001.cl/guia-de-apoyo/>
- Al-Safran, E., Aql, A., & Nguyen, T. (2017). Analysis and prediction of fluid flow behavior in progressing cavity pumps. *Journal of Fluids Engineering*, 139(12).
- Andrade, S. F. A., Valério, J. V. V., & Carvalho, M. S. (2010). Asymptotic Approach for Modelling Progressive Cavity Pumps Performance. *Mecánica Computacional*, 29, 8429-8445.
- Bellarby, J. (2009). Artificial Lift. *Developments in Petroleum Science*, 56, 303-369.
- Bello-Angulo, D., Mantilla-Duarte, C., Montes-Paez, E., & Guerrero-Martin, C. (2021). Box–Jenkins Methodology Application to Improve Crude Oil Production Forecasting: Case Study in a Colombian Field. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-10.
- Boyce, A. S. (2005). Progressing cavity pumps—a jack of all trades. *World Pumps*, 2005(466), 18-21.

- Camacho, R. P., & Grosso, J. L. (2003). Criterios para la selección del sistema de levantamiento artificial para crudos pesados y extrapesados. *Fuentes: El reventón energético*, 3(1), 2.
- Ceballos, J. B., & Vivas-Albán, O. A. (2019). Mathematical model of controllers for progressive cavity pumps. *Revista UIS Ingenierías*, 18(2), 17-30.
- Chen, J., Liu, H., Wang, F., Shi, G., Cao, G., & Wu, H. (2013). Numerical prediction on volumetric efficiency of progressive cavity pump with fluid–solid interaction model. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 109, 12-17.
- Chen, J., Wang, F., Shi, G., Cao, G., He, Y., Ge, W., ... & Wu, H. (2015). Finite element analysis for adhesive failure of progressive cavity pump with stator of even thickness. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 125, 146-153.
- Ciulla, F. (1999). Principios fundamentales para diseño de sistemas con bomba de cavidad progresiva. 20 – 114.
- Dunn, L., Matthews, C., & Zahacy, T. (1994). Progressing cavity pumping systems: design, operation and performance optimization. Course Notes, C-FER, Edmonton, Alberta, Canada.
- Edwards, J. (2004, January). Improving energy efficiency in E&P operations. In SPE International Conference on Health, Safety, and Environment in Oil and Gas Exploration and Production. Society of Petroleum Engineers.
- Fiedler, T., & Mircea, P. M. (2012, October). Energy management systems according to the ISO 50001 standard—Challenges and benefits. In 2012 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE) (pp. 1-4)

- García-León, R. A., Flórez-Solano, E., & Rodríguez-Castilla, M. (2019). Application of the procedure of the ISO 50001 2011 standard for energy planning in a company ceramic sector. *Dyna*, 86(209), 113-119.
- Grassian, D., & Olsen, D. B. (2021). Practical Applications of Net Energy Analysis of Upstream Oil and Gas Processes. *Journal of Energy Resources Technology*, 143(6).
- Howell, M. T. (2014). *Effective implementation of an ISO 50001 energy management system (EnMS)*. Milwaukee: ASQ Quality Press.
- Lea Jr, J. F., & Rowlan, L. (2019). Gas well deliquification. Gulf Professional Publishing.
- Lehman, M. (2004). Progressing cavity pumps in oil and gas production. *World Pumps*, 2004(457), 20-22.
- Long, J. F., Rowlan, L., & McCoy, J. (1999). Artificial lift power efficiency. In proceedings of the annual southwestern petroleum short course (pp. 52-63). Texas tech university.
- Moineau, R. (1930). Un nouveau capsulisme.
- Nguyen, K., Nguyen, T. C., & Al-Safran, E. (2021). Modeling the performance of progressive cavity pump under downhole conditions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 198, 108121.
- Nguyen, T. (2020). Artificial Lift Methods. *Petroleum Engineering*.
- Nguyen, T., Tu, H., Al-Safran, E., & Saasen, A. (2016). Simulation of single-phase liquid flow in progressing cavity pump. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 147, 617-623.
- Ortega, D., Salinas, L., & Granados, D. (2014). Lessons learned and best practices for progressive cavity pumps systems in colombian fields.
- Páez, E. G. M., González, F. E. C., & Duarte, C. A. M. (2016). Aplicación de series de tiempo en la realización de pronósticos de producción. *Fuentes: El reventón energético*, 14(1), 79-88.

- Quintero, R. M., Lamus, C. M., Garzón, S. A., Páez, E. M., & Cepeda Gómez, F. (2016). Ajuste de la presión anular en pozos con bloqueo por gas para optimización de producción en el campo cira infantas. *Fuentes, el reventón energético*, 14(2), 65-74
- Schmidt, C. (2015). A Benchmark for Assessing the Energy Efficiency of Artificial Lifts. 4.
- Useche-Narvaez, C., Montes-Páez, E. G., & Guerrero-Martin, C. A. (2021). Evaluation of the carbon footprint produced by conventional artificial lift systems in a Colombian field. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 108865.
- Voldsund, M., Nguyen, T. V., Elmegaard, B., Ertesvåg, I. S., Røsjorde, A., Jøssang, K., & Kjelstrup, S. (2014). Exergy destruction and losses on four North Sea offshore platforms: A comparative study of the oil and gas processing plants. *Energy*, 74, 45-58.
- Wittrisch, C., & Cholet, H. (2012). *Progressing Cavity Pumps Oil Well Production Artificial Lift*. Technip ophrys editions.

Apéndices

Apéndice A. Criterio de selección para sistema de bombeo por cavidades progresivas

	Rango típico	Máximo
Profundidad de operación	1000 - 5000 ft	9800 ft
	330 - 1550 m	3000 m
Volumen de operación	5 - 2500 BDP	5000 BPD
	1 - 400 m^3/dia	800 m^3/dia
Temperatura de operación	75 - 170 °F	300°F
	24 - 77 °C	150 °C
Desviación del pozo	N/A	< 15°/100ft
		< 15°/30m
Manejo de sólidos	Excelente	
°API	< 45	
Tipo de motor	Eléctrico o combustión interna	
Eficiencia del sistema	50% a 75%	

Apéndice B. Diseño de pozos con sistemas de bombeo por cavidades progresivas mediante software

INFORMACIÓN DE POZO		PROPIEDADES DEL FLUIDO	
Casing	7" P-110, 29 lbs/ft	API	21°
Tubing	3.5" 9.3 lbs/ft	Salinidad del agua	4000 ppm
Varillas	970N 1-1/8"	Gravedad específica del gas	0,7
Perforados	3218 ft	GOR	50 scf/STB
Prof asent bomba	2900 ft	BS&W	91%
DATOS DE PRODUCCIÓN		PARÁMETROS DE DISEÑO	
Producción estimada	600 Bls/día	Velocidad máxima	297 RPM
Corte de agua	96%	Eficiencia de la bomba	60%
Sumergencia	200 ft	Eficiencia del cabezal	95%
THP	90 psi	Eficiencia de las correas	95%
CHP	0 psi	Max carga de presión bomba	80%
		Costo de energía	0.14 \$/kwh

Datos de entrada requeridos para el diseño de PCP en cada pozo

Profundidad Media (MD) (ft)	Inclinación (deg)	Azimuth (deg)
0,00	0,00	0,00
396,00	1,01	251,23
535,00	0,68	212,91
598,00	0,74	178,50
659,00	0,92	144,56
726,00	0,98	125,27
788,00	1,83	121,27
852,00	1,99	104,76
915,00	2,59	123,50
978,00	2,83	120,24
1041,00	3,63	120,17
1105,00	4,09	107,90
1168,00	4,99	111,07
1232,00	6,00	107,17
1295,00	6,99	108,60
1359,00	7,81	107,27
1422,00	8,41	111,65
1482,00	9,22	120,27
1546,00	9,18	125,22
1609,00	9,01	133,24
1671,00	9,57	138,80

Data suministrada para determinar la geometría del pozo

Bomba de cavidad progresiva

Model 76 K 1200 SL

Tasa de flujo 76 m³/día , 478 bls/día a 100 rpm y 0 en cabeza

Cabeza de la bomba 1200 m (4000ft) (Head rating)

Selección de la bomba. Especificaciones de cada bomba de acuerdo con su capacidad de desplazamiento y capacidad de levantamiento.

TUBERÍA Y VARILLAS		
Casing		
Talla y peso	7 in, 29 lb/ft	
Tubing		
Talla y peso	API EUE, 3.5 in, 9.30 lb/ft	
Varillas		
Talla y peso	Continua, COROD, 1 in	

Carga de datos

EQUIPO DE SUPERFICIE		
Cabezal		
Tipo	MG 2000 19T	
Correas		
Relación de correas	4:01	
Motor		
Configuración	100 HP, 1200 RPM	

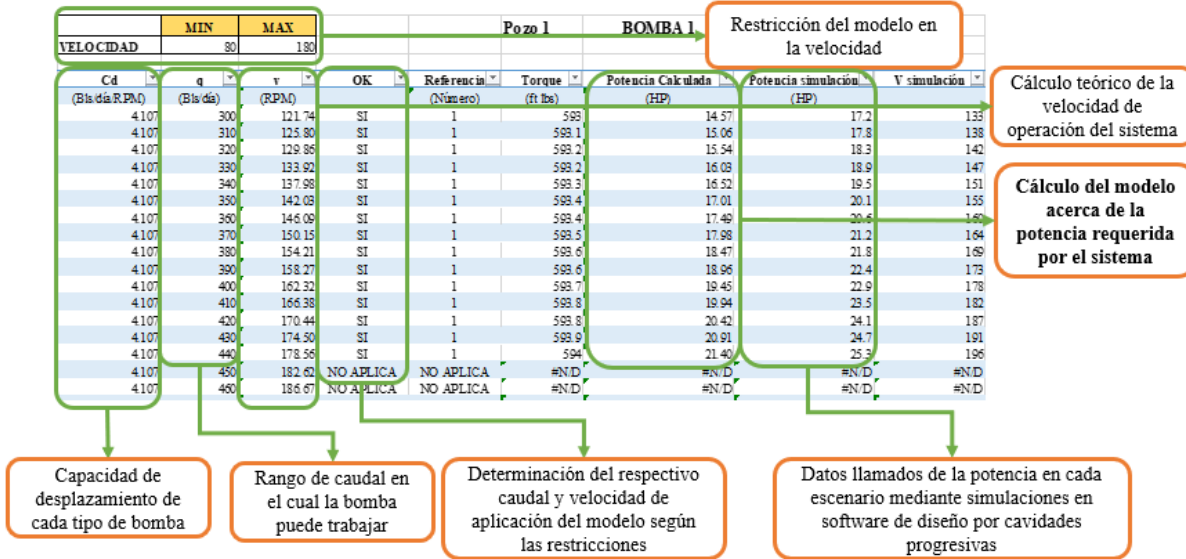
Carga de datos componentes en superficie

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
				Variación Q	Bomba	Desplazamiento	Pump pressure rating	Velocidad	Eficiencia Volumétrica	Caudal	Nivel de Ruido	Sumergencia	Profundidad de asentamiento	Presión de fondo	Costo de la energía	System Input power	Pressure Intake Pump
						(Baldia RPM)	(psi)	(RPM)	(%)	(Baldia)	(ft)	(ft)	(ft)	(psi)	(Baldia)	(HP)	(psi)
4			1		300 Vvaatherford (875-2800)	6.164	150.004	71	70	300	2781	1600	3781	895	5.27	10.4	683
5			2		310 Vvaatherford (875-2800)	6.164	150.004	73	70	310	2781	1600	3781	895	5.58	10.7	683
6			3		320 Vvaatherford (875-2800)	6.164	150.004	75	70	320	2781	1600	3781	895	5.89	11	683
7			4		330 Vvaatherford (875-2800)	6.164	150.004	76	70	330	2781	1600	3781	895	6.2	11.4	683
8			5		340 Vvaatherford (875-2800)	6.164	150.004	80	70	340	2781	1600	3781	895	10.51	11.7	683
9			6		350 Vvaatherford (875-2800)	6.164	150.004	82	70	350	2781	1600	3781	895	10.82	12.1	683
10			7		360 Vvaatherford (875-2800)	6.164	150.004	85	70	360	2781	1600	3781	895	11.13	12.4	683
11			8		370 Vvaatherford (875-2800)	6.164	150.004	87	70	370	2781	1600	3781	895	11.44	12.8	683
12			9		380 Vvaatherford (875-2800)	6.164	150.004	90	70	380	2781	1600	3781	895	11.75	13.1	683
13			10		390 Vvaatherford (875-2800)	6.164	150.004	92	70	390	2781	1600	3781	895	12.06	13.5	683
14			11		400 Vvaatherford (875-2800)	6.164	150.004	94	70	400	2781	1600	3781	895	12.37	13.8	683
15			12		410 Vvaatherford (875-2800)	6.164	150.004	97	70	410	2781	1600	3781	895	12.68	14.2	683
16			13		420 Vvaatherford (875-2800)	6.164	150.004	99	70	420	2781	1600	3781	895	12.99	14.5	683
17			14		430 Vvaatherford (875-2800)	6.164	150.004	101	70	430	2781	1600	3781	895	13.3	14.9	683
18			15		440 Vvaatherford (875-2800)	6.164	150.004	104	70	440	2781	1600	3781	895	13.61	15.2	683
19			16		450 Vvaatherford (875-2800)	6.164	150.004	106	70	450	2781	1600	3781	895	13.92	15.6	683
20			17		460 Vvaatherford (875-2800)	6.164	150.004	108	70	460	2781	1600	3781	895	14.23	15.9	683
21			18		470 Vvaatherford (875-2800)	6.164	150.004	111	70	470	2781	1600	3781	895	14.54	16.3	683
22			19		480 Vvaatherford (875-2800)	6.164	150.004	113	70	480	2781	1600	3781	895	14.86	16.6	683
23			20		490 Vvaatherford (875-2800)	6.164	150.004	115	70	490	2781	1600	3781	895	15.17	17	683
24			21		500 Vvaatherford (875-2800)	6.164	150.004	118	70	500	2781	1600	3781	895	15.48	17.3	683
25			22		510 Vvaatherford (875-2800)	6.164	150.004	120	70	510	2781	1600	3781	895	15.79	17.6	683

Se realiza el planteamiento de los escenarios de simulación donde se obtienen todos los datos de salida del software de diseño

Apéndice C. Aplicación del modelo propuesto: paso a paso.

CARGA DE DATA REQUERIDA PARA EL MODELO PROPUESTO



	MIN	MAX	Pozo 1		BOMBA 1				
VELOCIDAD	80	180							
Cd	q	v	OK	Referencia	Torque	Potencia Calculada	Potencia simulación	V simulación	
(Bls/día/RPM)	(Bls/día)	(RPM)		(Número)	(ft lbs)	(HP)	(HP)		
4.107	300	121.74	SI	1	593	14.5	17.2	133	
4.107	310	125.80	SI	1	593.1	15.00	17.8	138	
4.107	320	129.86	SI	1	593.2	15.54	18.3	142	
4.107	330	133.92	SI	1	593.2	16.03	18.9	147	
4.107	340	137.98	SI	1	593.3	16.52	19.5	151	
4.107	350	142.03	SI	1	593.4	17.01	20.1	155	
4.107	360	146.09	SI	1	593.4	17.49	20.6	160	
4.107	370	150.15	SI	1	593.5	17.98	21.2	164	
4.107	380	154.21	SI	1	593.6	18.47	21.8	169	
4.107	390	158.27	SI	1	593.6	18.96	22.4	173	
4.107	400	162.32	SI	1	593.7	19.45	22.9	178	
4.107	410	166.38	SI	1	593.8	19.94	23.5	182	
4.107	420	170.44	SI	1	593.8	20.42	24.1	187	
4.107	430	174.50	SI	1	593.9	20.9	24.7	191	
4.107	440	178.56	SI	1	594	21.40	25.3	196	
4.107	450	182.62	NO APLICA	NO APLICA	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	
4.107	460	186.67	NO APLICA	NO APLICA	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	

La macro mediante el modelo calcula la potencia requerida por todo el sistema

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1															
2			Bomba 1			Ref	Bomba 2			Ref	Bomba 3			Ref	
3		Referencia	Q	POTENCIA	VELOCIDAD		Q	POTENCIA	VELOCIDAD		Q	POTENCIA	VELOCIDAD		
4		1	300	14,567952	121,74336	1	300	13,858728	90,5469033	2	300	13,800187	81,116583	3	
5		2	310	15,056089	125,80148	1	310	14,322596	93,5651334	2	310	14,2618846	83,8200303	3	
6		3	320	15,54439	129,85959	1	320	14,786588	96,5833635	2	320	14,7236914	86,5239022	3	
7		4	330	16,030152	133,9177	1	330	15,250702	99,6015936	2	330	15,1874078	89,2277742	3	
8		5	340	16,518698	137,97581	1	340	15,714941	102,619824	2	340	15,6494873	91,9316461	3	
9		6	350	17,007408	142,03393	1	350	16,179302	105,638054	2	350	16,11676	94,6355181	3	
10		7	360	17,493334	146,09204	1	360	16,643787	108,656284	2	360	16,5739738	97,33393	3	
11		8	370	17,98229	150,15015	1	370	17,106114	111,674514	2	370	17,0363808	100,043262	3	
12		9	380	18,47141	154,20826	1	380	17,570784	114,692744	2	380	17,4988968	102,747134	3	
13		10	390	18,9675	158,26637	1	390	18,035576	117,7109807	2	390	17,961522	105,451006	3	
14		11	400	19,468865	162,32449	1	400	18,500492	120,729204	2	400	18,4242563	108,154878	3	
15		12	410	19,96394	166,3826	1	410	18,965532	123,747435	2	410	18,8870997	110,85875	3	
16		13	420	20,422647	170,44071	1	420	19,430694	126,765665	2	420	19,3500523	113,562622	3	
17		14	430	20,912422	174,49882	1	430	19,89598	129,783895	2	430	19,8131139	116,266494	3	
18		15	440	21,402361	178,55694	1	440	20,36139	132,802125	2	440	20,2788854	118,970366	3	
19		16	450	#N/D	182,61505	1	450	20,826922	135,820355	2	450	20,7420199	121,674238	3	
20		17	460	#N/D	186,67316	1	460	21,292578	138,838585	2	460	21,2054635	124,378109	3	
21		18	470	#N/D	190,73127	1	470	21,758357	141,856815	2	470	21,6715806	127,081981	3	
22		19	480	#N/D	194,78938	1	480	22,224259	144,875045	2	480	22,135297	129,785853	3	
23		20	490	#N/D	198,8475	1	490	22,690284	147,893275	2	490	22,5991225	132,489725	3	
24		21	500	#N/D	202,90561	1	500	23,156433	150,911505	2	500	23,0630571	135,193597	3	
25		22	510	#N/D	206,96372	1	510	23,622705	153,929736	2	510	23,5271009	137,897469	3	
26		23	520	#N/D	211,02183	1	520	24,089101	156,947966	2	520	23,994091	140,601341	3	
27		24	530	#N/D	215,07994	1	530	24,558886	159,966196	2	530	24,4584076	143,305213	3	
28		25	540	#N/D	219,13806	1	540	25,02559	162,984426	2	540	24,9228333	146,009085	3	
29		26	550	#N/D	223,19617	1	550	25,492416	166,002656	2	550	25,390369	148,712957	3	
30		27	560	#N/D	227,25428	1	560	25,959366	169,020887	2	560	25,8550675	151,416829	3	
31		28	570	#N/D	231,31239	1	570	26,42644	172,039118	2	570	26,3198751	154,120701	3	
		DATOS DE DISEÑO				Simulaciones	Simulaciones (2)	Simulaciones (3)	Cd 4.107	Cd 5.52					

Datos relevantes calculados por el modelo para cada bomba

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1																		
2			Bomba 1				Ref	Bomba 2				Ref	Bomba 3				Ref	
3		Referencia	Q	POTENCIA	POTENCIA F	% ERROR	Q	POTENCIA	POTENCIA F	% ERROR	Q	POTENCIA	POTENCIA F	% ERROR				
4		1	300	14,56795202	17,2	15,30%	300	13,85972777	16,2	14,45%	300	13,80	16,3	15,34%	3			
5		2	310	15,05608898	17,8	15,42%	310	14,32259606	16,7	14,24%	310	14,26	16,8	15,11%	3			
6		3	320	15,54438968	18,3	15,06%	320	14,78658762	17,2	14,03%	320	14,72	17,4	15,38%	3			
7		4	330	16,03015188	18,9	15,18%	330	15,25070245	17,8	14,32%	330	15,19	17,9	15,15%	3			
8		5	340	16,51869824	19,5	15,29%	340	15,71494058	18,3	14,13%	340	15,65	18,5	15,41%	3			
9		6	350	17,00740804	20,1	15,39%	350	16,17930193	18,9	14,40%	350	16,11	19	15,20%	3			
10		7	360	17,49332436	20,6	15,08%	360	16,64378858	19,4	14,21%	360	16,57	19,6	15,44%	3			
11		8	370	17,98229018	21,2	15,18%	370	17,10611398	19,9	14,04%	370	17,04	20,1	15,24%	3			
12		9	380	18,47140979	21,8	15,27%	380	17,57078352	20,5	14,29%	380	17,50	20,7	15,46%	3			
13		10	390	18,96749952	22,4	15,37%	390	18,03557625	21	14,12%	390	17,96	21,2	15,28%	3			
14		11	400	19,46884739	22,9	15,08%	400	18,50049245	21,6	14,35%	400	18,42	21,7	15,35%	3			
15		12	410	19,96393383	23,5	15,16%	410	18,96553181	22,1	14,18%	410	18,89	22,3	15,30%	3			
16		13	420	20,42264734	24,1	15,26%	420	19,43069445	22,7	14,40%	420	19,35	22,8	15,13%	3			
17		14	430	20,91242205	24,7	15,33%	430	19,89589035	23,2	14,24%	430	19,81	23,4	15,33%	3			
18		15	440	21,40236054	25,3	15,41%	440	20,36139953	23,7	14,09%	440	20,28	23,5	15,18%	3			
19		16	450	#N/D	#N/D	#N/D	450	20,82692188	24,3	14,28%	450	20,74	24,5	15,34%	3			
20		17	460	#N/D	#N/D	#N/D	460	21,2925777	24,8	14,14%	460	21,21	25	15,18%	3			
21		18	470	#N/D	#N/D	#N/D	470	21,75835688	25,4	14,34%	470	21,67	25,6	15,39%	3			
22		19	480	#N/D	#N/D	#N/D	480	22,22425895	25,9	14,19%	480	22,14	26,1	15,19%	3			
23		20	490	#N/D	#N/D	#N/D	490	22,69028448	26,5	14,38%	490	22,60	26,7	15,36%	3			
24		21	500	#N/D	#N/D	#N/D	500	23,15643328	27	14,24%	500	23,06	27,2	15,24%	3			
25		22	510	#N/D	#N/D	#N/D	510	23,62270535	27,6	14,41%	510	23,53	27,8	15,37%	3			
26		23	520	#N/D	#N/D	#N/D	520	24,08910069	28,1	14,27%	520	23,99	28,3	15,22%	3			
27		24	530	#N/D	#N/D	#N/D	530	24,55888999	28,6	14,13%	530	24,46	28,9	15,37%	3			
28		25	540	#N/D	#N/D	#N/D	540	25,02558951	29,2	14,30%	540	24,92	29,4	15,23%	3			
29		26	550	#N/D	#N/D	#N/D	550	25,4924163	29,7	14,17%	550	25,39	30	15,37%	3			
30		27	560	#N/D	#N/D	#N/D	560	25,95936636	30,3	14,33%	560	25,86	30,5	15,23%	3			
31		28	570	#N/D	#N/D	#N/D	570	26,4264397	30,9	14,20%	570	26,32	31,1	15,37%	3			
32		29	580	#N/D	#N/D	#N/D	580	26,8936363	31,4	14,35%	580	26,79	31,6	15,23%	3			
33		30	590	#N/D	#N/D	#N/D	590	27,36095618	31,9	14,23%	590	27,25	32,2	15,38%	3			
34		31	600	#N/D	#N/D	#N/D	600	#N/D	#N/D	2	600	27,72	32,8	15,49%	3			
35					Error promedio	15,25%			Error promedio	14,25%				Error promedio	15,29%			
		Simulaciones			Simulaciones (2)	Simulaciones (3)	Cd 4.107	Cd 5.522	Cd 6.164	Análisis AG	% Error							

Porcentajes de error promedio para cada tipo de bomba