

# Diseño del Modelado Matemático para el Diagnóstico de Pozos de Extracción por Bombeo de Cavidades Progresivas

Edgar Camargo  
PDVSA, Distrito Socialista Tecnológico -AIT  
Mérida, 5101, Venezuela  
camargoea@gmail.com

Egner Aceros  
Facultad de Ingeniería, División de Postgrado  
Universidad del Zulia Maracaibo, 4001, Venezuela  
egner.aceros@cantv.net

Lice Guzmán  
PDVSA, Distrito Socialista Tecnológico -AIT  
Mérida, 5101, Venezuela  
guzmanlp@pdvsa.com

Mariuska Briceño  
PDVSA, Distrito Socialista Tecnológico -AIT  
Mérida, 5101, Venezuela  
bricenomh@pdvsa.com

**Resumen—** Con el objetivo de hacer más eficientes los procesos involucrados en la optimización de sistemas de producción de hidrocarburos, la industria petrolera nacional se ha apoyado en diversas herramientas, especialmente en aquellas que proveen soluciones integrales e innovadoras. En este artículo se presenta el diseño de un sensor virtual híbrido, para el diagnóstico de un pozo con Bombeo de Cavidades Progresivas aplicando inteligencia artificial, a través de modelado difuso y del modelo matemático obtenido para la inferencia de parámetros operacionales. Los resultados demuestran el buen desempeño y la exactitud en la predicción de parámetros críticos como la tasa de producción del crudo y la carga axial.

**Palabras Clave:** Bombeo por Cavidades Progresivas, Lógica difusa, Sensor Virtual, Estado operacional, Diagnóstico.

## I. INTRODUCCIÓN

En la producción de hidrocarburos el objetivo fundamental es maximizar el valor de un activo (petróleo) que decrece en forma permanente, al menor costo posible, es por ello que los métodos de levantamiento artificial se utilizan en un alto porcentaje en todo el mundo, con el propósito de mantener y/o extender la fase de extracción de crudo en los pozos de producción. Así, basados en metas de producción, los expertos en el área se han visto en la necesidad de aplicar técnicas y métodos de recuperación secundaria de crudo, entre los cuales destaca el Bombeo de Cavidades Progresivas (BCP) como sistema de levantamiento artificial.

Para una toma de decisiones acertada y pertinente del desempeño del sistema, se requiere de numerosa información vital: curva de declinación, balance de materia, curva de comportamiento del pozo, simulaciones y modelos del yacimiento; todo esto en tiempo real o casi real. El uso de técnicas eficientes y confiables del filtrado de la información (minería de datos, inteligencia artificial, etc) y la asimilación de estos datos es indispensable para manejar la gran cantidad de información que se genera a partir del monitoreo continuo a

tiempo real, con integración efectiva de sensores remotos para actualizar los datos del reservorio y con ello optimizar el proceso, a través de un seguimiento adecuado y eficiente de las condiciones del pozo, fases y tasas de flujo, presión del reservorio y monitoreo de la arenas, etc.

Es importante considerar que, de los datos obtenidos, depende la calidad de las decisiones tomadas. En ese sentido, se requiere la implementación de herramientas tecnológicas adaptadas al contexto de la industria petrolera venezolana especialmente debido al esquema actual de explotación de reservas no convencionales de crudos pesados y extra-pesados

En este artículo se presenta el diseño y la implantación de una herramienta computacional para tarea de predicción, denominada Sensor Híbrido, el cual permite la estimación de parámetros operacionales en procesos petroleros, combinando las ventajas de los sistemas difusos con modelos matemáticos para la estimación de variables ([1],[2]). Dicho sistema usa datos operacionales, a los cuales se les realiza un tratamiento previo para limpiarlos, filtrarlos, analizar la correlación entre ellos, entre otras cosas, para que los resultados obtenidos sean satisfactorios. La validación del modelo del sensor híbrido se realiza a través de la comparación con el escenario real objeto de estudio. Específicamente, se propone la predicción de carga axial de una bomba BCP utilizando modelos matemáticos [2] y la predicción de la tasa de producción utilizando una técnica difusa jerárquica, debido a la importancia operacional de estas variables apoyando el diagnóstico de problemas y el análisis para su resolución.

## II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### A. Pozos por Levantamiento Artificial por Bombeo Cavidad Progresiva

Se utilizan técnicas de levantamiento artificial cuando los yacimientos no cuentan con suficiente energía como para

producir petróleo o gas en forma natural para conducirlos a la superficie, o cuando las tasas de producción no cumplen con los objetivos deseados. El sistema BCP es una tecnología que ha demostrado ser la más eficiente en levantamiento artificial para la producción de petróleos con elevada viscosidad y en pozos de difícil operación (alta temperatura, presencia de gas y porcentajes de agua elevados), ya que los componentes de este sistema son especialmente diseñados para trabajar eficazmente en condiciones extremas. Una bomba de cavidad progresiva (BCP) consiste en una máquina rotativa de desplazamiento positivo, la cual consiste en un engranaje helicoidal enroscado extremo simple (rotor), que rota excéntricamente dentro de un engranaje helicoidal enroscado (estator). El principio de funcionamiento es por transmisión de movimiento rotacional a través del motor hacia una sarta de cabillas por medio de distintos engranajes, esta sarta de cabillas hace girar al rotor, formando cavidades progresivas ascendentes y el crudo se desplaza hasta la superficie por efecto del rotor que gira dentro del estator fijo. El estator es el componente estático de la bomba y contiene un polímero de alto peso molecular con la capacidad de deformación y recuperación elástica llamado elastómero [3].

Los componentes del sistema de BCP se dividen en dos conjuntos, los equipos de superficie y el equipo de subsuelo. A nivel de superficie, se dispone de un motor eléctrico, un cabezal que dispone de un sistema de freno, un sistema de poleas y correas, y un stuffing box o prensaestopas, que sirve para evitar la filtración de fluidos a través de las conexiones de superficie. El sistema de transmisión, transfiere la energía desde el motor hasta el cabezal de rotación. La barra lisa o pulida va ubicada al final de la sarta de cabillas y su principal función es transmitir el movimiento de rotación del cabezal a la sarta de cabillas y el rotor y la Te de producción, es un dispositivo necesario en las instalaciones de bombas de cavidades progresivas, para dirigir el fluido de producción del tubing a la línea de producción de superficie (ver Figura 1)

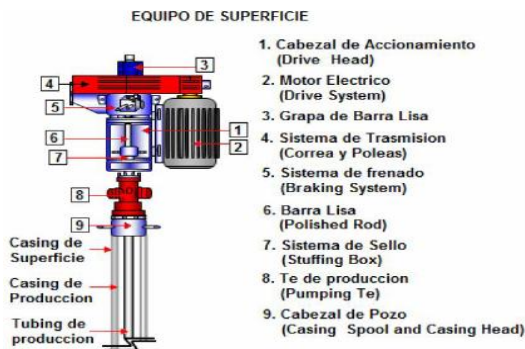


Figura 1. Partes del Equipo de Superficie del Sistema BCP

El equipo de subsuelo está conformado por la bomba, sus accesorios y la sarta de cabillas, esta última es la encargada de transferir la energía rotacional al rotor de la bomba y es la parte del sistema que soporta las fuerzas torsionales y axiales del

movimiento rotacional del motor y la columna de crudo que es desplazada hasta la superficie. La sarta de cabillas seleccionada debe estar en capacidad de soportar una cierta carga axial (peso aparente de la sarta y peso de la altura hidráulica) y de transmitir un torque determinado desde la superficie hasta el fondo del sistema, compuesto por la fuerza para levantar el crudo y los esfuerzos de fricción por el movimiento giratorio de las cabillas. También posee un pin de paro que sirve como punto de referencia para el espaciamiento del rotor dentro del estator durante la instalación del sistema.

El estator también constituye parte de los equipos de subsuelo y son tubos de acero con cuerpos de elastómeros pegados internamente. Debido al movimiento rotatorio del rotor, se corre un riesgo potencial de desenroscar la tubería de producción en cualquier punto susceptible de la misma, sobre todo en aquellas aplicaciones donde eventualmente se producen incrementos de torque, por lo que se utilizan anclas; y finalmente la tubería de producción, es el equipo de subsuelo formado por un conjunto de tubos que transportan el fluido desde el fondo del pozo hasta la superficie y al mismo tiempo sirve de guía a la sarta de cabillas (ver Figura 2)

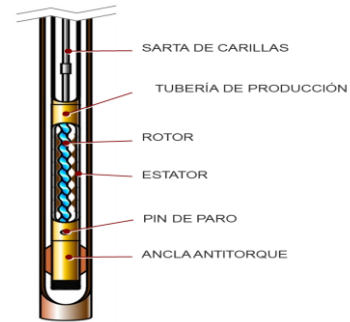


Figura 2. Partes del Equipo de Subsuelo del Sistema BCP

### B. Variables Operacionales del Sistema BCP

Los hidrocarburos a través de las arenas productoras en el yacimiento, dependen de la presión de burbuja ( $P_b$ ) y las condiciones de temperatura en fondo ( $T_{wf}$ ), esta presión varía con el tiempo y va disminuyendo a lo largo del tiempo y es aproximadamente igual la presión de entrada a la bomba (PIP). Es de suma importancia contar con mediciones de la presión de fondo ya que la bomba BCP requiere de una presión de entrada y de descarga, mediante las cuales se estima su eficiencia en cuanto a producción. La Presión de descarga de la bomba (PDP), es la presión a la salida de la bomba y es generada por la acción de la bomba y el nivel de sumergencia (NS), esta presión se ve reflejada en la presión de superficie en cabezal y es equivalente a la presión de cabezal (THP). El nivel de sumergencia (NS), es el nivel de la columna de fluido en la tubería de revestimiento (Casing) con respecto a la superficie, este nivel es determinante para el funcionamiento de la bomba BCP, ya que a mayor nivel de sumergencia, mayor será la presión de entrada y mayor deberá ser el trabajo de la bomba para elevar la columna de fluido, por esto es necesario que el nivel de sumergencia permanezca en valores bajos, pero que sea lo suficiente para que la bomba no se achique o pierda

fluido de entrada. El torque, es la fuerza rotacional aplicada a la sarta de cabillas por el cabezal y transferida al rotor de la bomba BCP, la cual es inferida por el variador de frecuencia en superficie, y es de suma importancia para el diagnóstico del estado operacional de la bomba. Finalmente, la carga axial es la fuerza que actúa a lo largo del eje longitudinal de un miembro estructural, aplicada al centroide de la sección transversal del mismo produciendo un esfuerzo uniforme, esta fuerza en el sistema BCP representa la carga soportada por la sarta de cabillas, que incluye la fuerza del peso de la sarta y la columna de fluido en la tubería de producción. A través del modelo matemático que representa esta fuerza se infiere la carga axial y a partir de la misma se estima la producción del sistema BCP [3].

### C. Sistemas Difusos

La Lógica Difusa (LD) constituye una técnica de gran importancia en el modelado de sistemas, pues los modelos lógicos - difusos pueden ser usados para describir fenómenos complejos difíciles de modelar mediante métodos formales [2]. Entre las ventajas de la lógica difusa esta la posibilidad de hacer un razonamiento o procesamiento con información imprecisa o borrosa. Un modelo lógico-difuso (sistema difuso) consta fundamentalmente de una base de conocimientos, conformada por un conjunto de reglas del tipo Si-Entonces con proposiciones imprecisas expresadas en lenguaje natural, y de un mecanismo de inferencia que permite obtener una conclusión a partir de una entrada determinada. Las reglas permiten establecer las relaciones entre las diferentes variables, llamadas entradas, para generar ciertas conclusiones ([4],[5]). El conocimiento codificado en la base de reglas se deriva de la experiencia y de la intuición humana, además del conocimiento práctico y teórico que se disponga del sistema. Cada una de las reglas de la base de conocimientos esta caracterizada por una parte "Si" llamada el antecedente y una parte "Entonces" llamada el consecuente. El antecedente de una regla contiene un conjunto de condiciones y el consecuente contiene una conclusión. Cada regla opera de la siguiente forma: si las condiciones del antecedente son satisfechas, entonces la conclusión del consecuente es aplicada. Para un modelo difuso las variables incluidas en el antecedente corresponden a las entradas del sistema y las variables incluidas en el consecuente corresponden a las salidas del sistema [5]. Las condiciones contenidas en el antecedente y las conclusiones del consecuente de las reglas consisten en proposiciones de la forma  $F$  es  $X_o$ , donde  $F$  es una variable y  $X_o$  es un conjunto difuso definido sobre el universo de discurso de la variable  $F$ .

Para desarrollar un clasificador difuso basta en muchos de los casos utilizar alguna de las funciones de similitud y ya establecidas, tales como la función triangular o la trapezoidal, es decir, no es necesario concebir una nueva función de pertenencia difusa, el esfuerzo se enfoca entonces en conocer los datos de entrada y con base en la experiencia que se tenga, saber cuál es la más apropiada para modelar y clasificar (ver Figura 3)

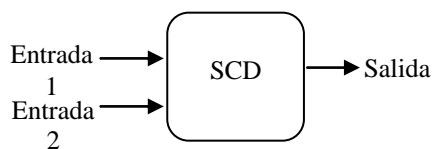


Figura 3. Modelo de un SCDM Clásico

Por otra parte, un Sistema Difuso Multicapa (SDM) consiste en un número de sistemas difusos distribuidos de forma jerárquica, los cuales poseen la ventaja de que el número total de reglas de su base de conocimiento es menor, y son más simples, que un sistema difuso convencional. El tipo más tradicional de SDM es aquel en el que cada módulo es un sistema difuso (SD) completo que relaciona a un conjunto reducido de variables, que pueden ser variables de entrada del sistema global o variables internas generadas como salidas de otros módulos [5]. Existen otros enfoques como el que consiste en identificar partes comunes del conjunto de reglas y definir módulos para esas partes comunes [5]. Nuestro trabajo usa el primer enfoque, que se puede ver en la (ver Figura 4)

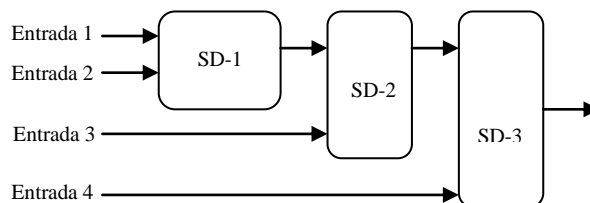


Figura 4. Modelo de un SCDM Jerárquico

## III. DISEÑO DEL SISTEMA HÍBRIDO

El diseño del sistema híbrido está compuesto por varias fases: 1) una fase (componente) de generación del modelo del pozo, en la cual se proponen utilizar técnicas de balance de masa y energía; 2) una fase (componente) de identificación del escenario operacional del pozo, empleando lógica difusa; y 3) una fase (componente) de optimización del proceso productivo para el escenario identificado, proponiendo el uso de técnicas evolutivas basadas en restricciones del proceso y el costo operacional de producción [3]. Además, tiene un componente de instrumentación que le permite capturar las variables del sistema, en este caso en particular las variables de inyección y producción.

### A. Fase Modelado de la Carga Axial Sistema BCP

Una de las variables que describe el funcionamiento y estado operacional del sistema BCP es la carga axial. Esta variable puede ser medida con una celda de carga instalada en el cabezal del sistema BCP o puede ser inferida a través de un modelo matemático, a partir de las mediciones de variables con sensores existentes y los datos de diseño del sistema de levantamiento por BCP. El modelo matemático de la Ecuación 1 para la inferencia de la carga axial parte de la definición de fuerza, la ecuación que define el nivel de sumergencia y el diferencial de presión de la bomba, más la aplicación de un

diagrama de cuerpo libre en la sarta de cabillas, obteniéndose un sistema de ecuaciones, que por medio de sustitución y despeje permite obtener el modelo matemático que describe el comportamiento de la carga axial a partir de la medición de dos presiones a nivel de superficie, en este caso la presión de casing y presión de cabezal.

$$Ca = \frac{Ab * Ac}{Ab - Ac} * \left( \frac{wr * (0,88) * Gesp * L + Pc * Ar}{Ac} + THP \right) \quad (1)$$

Donde:

- Ca: Carga axial
- Ab: Área de la bomba
- Ac: Área transversal del casing
- wr: Densidad de peso de las cabillas
- Gesp: Gravedad específica del crudo
- L: Longitud de la sarta de cabillas
- Pc: Presión del casing
- Ar: Área transversal del rotor
- THP: Presión del cabezal equivalente a la presión de descarga de la bomba

El modelo matemático de la carga axial fue programado y probado en Python, a partir de los datos históricos de la presión de casing y presión de cabezal medidas en campo, se comprobó que el modelo sigue el comportamiento físico real. Luego de comprobar el funcionamiento del sensor virtual de carga axial con los datos históricos, se determinó el caudal de producción estimado, a partir de la curva de afluencia del pozo (IPR), de la Ecuación 2 la cual muestra el aporte del yacimiento en barriles, según la presión de fondo. La curva IPR se establece a través de métodos matemáticos definidos de acuerdo a las características del yacimiento, en específico a la presión de burbuja (Pb), que estipula un punto de referencia en la elección del método a aplicar para la determinación de la IP, al ser comparado con la presión de fondo fluente del pozo (Pwf). Existen tres métodos, Vogel, Darcy y lineal. El método de Vogel es el más aplicado ya que describe el aporte del pozo para presiones de fondo menores y mayores a la presión de burbuja, por lo que se considera un método estándar. El modelo matemático de Vogel para obtener la curva IP se muestra a continuación.

$$IP = \frac{Q}{Pwf - Pb + \left( \frac{Pb}{1,8} \right) * \left( 1 - 0,2 * \left( \frac{Pwf}{Pb} \right) - 0,8 * \left( \frac{Pwf}{Pb} \right)^2 \right)} \quad (2)$$

Donde:

- IP: Índice de Productividad
- Q: Caudal de Producción
- Pwf: Presión de fondo fluente
- Pb: Presión de Burbuja

### B. Identificación de Escenarios Operacionales

Para el desarrollo del diseño del modelado matemático y la herramienta de diagnóstico se aplicó un sistema difuso

jerárquico. Luego se determinaron los parámetros a emplear en las funciones de membresía, para aplicar lógica difusa en la estimación de la producción del pozo según la carga axial calculada y la presión de entrada a la bomba, lo cual conforma el primer bloque del desarrollo de la herramienta de modelado mostrado en la (ver Figura 5)

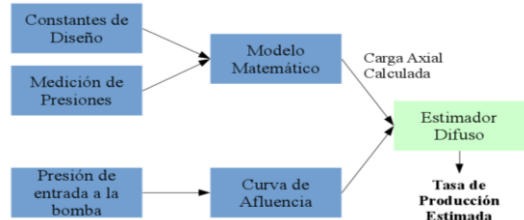


Figura 5. Primer Bloque Difuso de la Herramienta de Modelado Matemático

Este bloque se desarrolló en Python basados en los parámetros de los rangos para las funciones de membresía se procedió al diseño del estimador difuso y la inclusión de las reglas difusas, tipo Mandami, las cuales se muestran en la Figura 6. Con los datos de la carga axial estimada con el modelo matemático y la curva IPR obtenida, se estima la tasa de producción.

1. If (Caxial is bajo) and (IPR is bajo) then (Produccion is bajo) (1)
2. If (Caxial is bajo) and (IPR is medio) then (Produccion is medio) (1)
3. If (Caxial is bajo) and (IPR is alto) then (Produccion is bajo) (1)
4. If (Caxial is medio) and (IPR is bajo) then (Produccion is alto) (1)
5. If (Caxial is medio) and (IPR is medio) then (Produccion is medio) (1)
6. If (Caxial is medio) and (IPR is alto) then (Produccion is medio) (1)
7. If (Caxial is alto) and (IPR is bajo) then (Produccion is alto) (1)
8. If (Caxial is alto) and (IPR is medio) then (Produccion is alto) (1)
9. If (Caxial is alto) and (IPR is alto) then (Produccion is medio) (1)

Figure 6. Reglas Difusas del Primer Bloque de la Herramienta de Modelado en MATLAB

Una vez completado este bloque se procedió al desarrollo de la segunda etapa del sistema difuso jerárquico, con la que se estimó el estado operacional del sistema BCP (ver Figura 7)

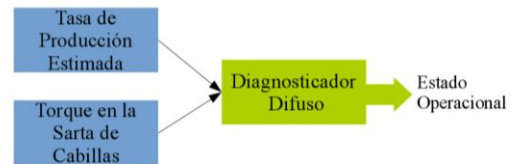


Figura 7. Esquema del Segundo Bloque del Sistema Difuso Jerárquico

Las variables de entradas de este segundo bloque son la tasa de producción estimada en el primer bloque del sistema difuso jerárquico, y el torque en la sarta de cabillas del sistema BCP. Siendo el torque una variable crucial a la hora de diagnosticar el estado operacional de la bomba, ya que las variaciones en el torque representan fallas tales como: rotura de la sarta de cabillas, fallas en el elastómero de la bomba, desgaste en la bomba, cambios en las características del flujo, errores en el diseño del sistema, entre otros. Por esto se toma como variable

junto con la tasa de producción estimada del pozo para determinar el estado operacional del sistema BCP. El estado operacional fue considerado en un rango de 0% a 100%; siendo 0% correspondiente a operatividad baja o sistema fuera de su rango operacional, y 100% el funcionamiento ideal y más eficiente del sistema BCP. Las reglas difusas aplicadas a este bloque se muestran en la (ver Figura 8)

```

1. If (QEstimada is bajo) and (Torque is bajo) then (EdoOperacional is bajo) (1)
2. If (QEstimada is bajo) and (Torque is medio) then (EdoOperacional is medio) (1)
3. If (QEstimada is bajo) and (Torque is alto) then (EdoOperacional is bajo) (1)
4. If (QEstimada is medio) and (Torque is bajo) then (EdoOperacional is alto) (1)
5. If (QEstimada is medio) and (Torque is medio) then (EdoOperacional is medio) (1)
6. If (QEstimada is medio) and (Torque is alto) then (EdoOperacional is medio) (1)
7. If (QEstimada is alto) and (Torque is bajo) then (EdoOperacional is alto) (1)
8. If (QEstimada is alto) and (Torque is medio) then (EdoOperacional is alto) (1)
9. If (QEstimada is alto) and (Torque is alto) then (EdoOperacional is medio) (1)
    
```

Figura 8. Reglas del Segundo Bloque del Sistema Difuso Jerárquico

### C. Características del Pozo a Estudiar

Para el diseño del modelado matemático se identificaron datos del pozo y sus características en la Tabla I.

TABLA I. DATOS DE DISEÑO DEL POZO

|  |        |
|--|--------|
| Área de la bomba (ft <sup>2</sup> )        | 3.5    |
| Área de las cabillas (ft <sup>2</sup> )    | 1.125  |
| Densidad de peso de las cabillas (lb/ft)   | 5.8    |
| Longitud de la sarta de cabillas(ft)       | 5430   |
| Área efectiva del rotor (ft <sup>2</sup> ) | 2.21   |
| Radio Casing (ft)                          | 0.557  |
| Radio Tubing (ft)                          | 0.1875 |

Las propiedades del fluido que la bomba BCP maneja se muestran en la Tabla II.

TABLA II. DATOS DE YACIMIENTO DEL POZO

|                                    |        |
|------------------------------------|--------|
| Gravedad específica del crudo      | 0.43   |
| Presión de reservorio (psi)        | 1600   |
| Temperatura de reservorio (°F)     | 158    |
| Factor Volumétrico del crudo       | 10.799 |
| Viscosidad del crudo (cp)          | 9000   |
| Producción por día promedio (BNPD) | 384.82 |

## IV. RESULTADOS

En esta sección se muestra una posible implementación del sensor virtual híbrido (Svh) para pozos BCP, así como los resultados de las pruebas realizadas para la validación del mismo, usando datos provenientes de un pozo de la industria petrolera venezolana. El propósito de este prototipo es la predicción de las variables Carga Axial y Producción. En el caso de Carga Axial se usa la ecuación 1 de autoría propia. Esta herramienta fue implantada en un controlador lógico

programable, usando el Lenguaje Python a nivel del cabezal del pozo. Dicha herramienta permite al operador estudiar ciertos escenarios, para poder tomar previsiones cuando en algunos de ellos ocurran fallas, y minimizar de esta manera sus efectos en las caídas de producción [2].

Los resultados de las simulaciones en MATLAB, a partir de los datos históricos de las variables operacionales, y la estimación de la carga axial determinada por el programa desarrollado en Python se muestran en las figuras a continuación. Donde se puede observar que en la Figura 9 la carga axial sigue el comportamiento físico del sistema con respecto a la presión de cabezal, debido que la presión del casing es constante.

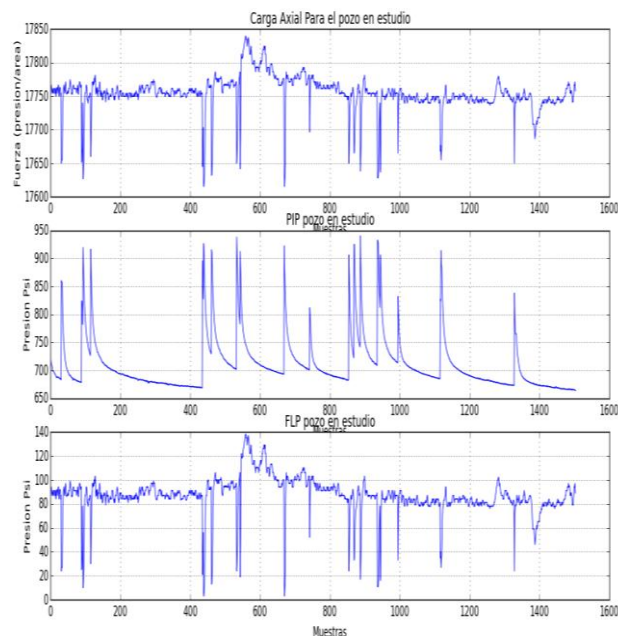


Figure 9. Carga Axial Estimada, PIP y FLP (equivalente a THP), Extraídas del Programa en Python

Por otra parte la tendencia que puede observarse en la Figure 10 de la producción estimada con respecto a la producción calculada a través de la curva de IPR es similar en ciertos puntos, ya que al existir baja de presión de fondo teóricamente debería subir la producción, pero este estado no lo garantiza, siempre y cuando la carga axial se mantenga en un rango alto y una presión de fondo baja se puede asegurar que hay una producción elevada.

Además se observa en la Figura 11 el estado operacional del sistema BCP en donde se perciben oscilaciones en el sistema debido a la falta de optimización del mismo, en donde no hubo un control eficiente en el variador de frecuencia del motor del sistema BCP, la toma de decisiones claves a partir del censado de presiones de fondo y cabezal, así como la no existencia de la estimación de la carga axial y el control inteligente del pozo a través de esta variable tan importante.



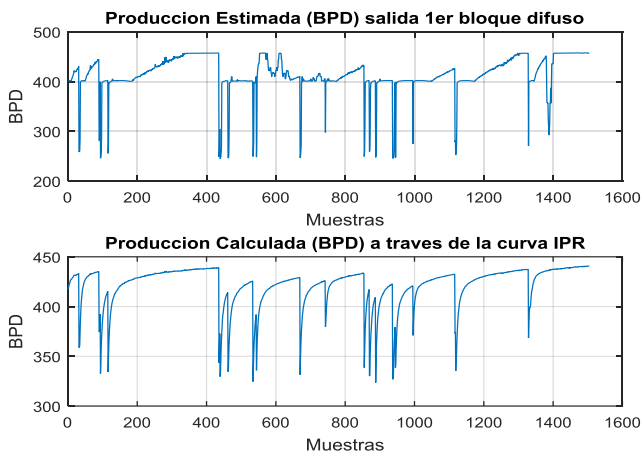


Figura 10. Producción Estimada y Producción Calculada por IPR

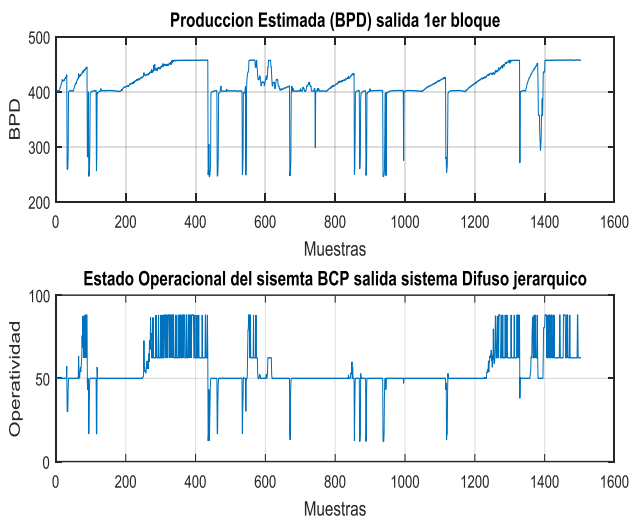


Figura 11. Salida del Primer Bloque Difuso y del Sistema Difuso Jerárquico

Se puede observar que la producción BPD (Barriles de Producción Diaria), la estimada difiere con la producción calculada ya que la producción estimada toma en cuenta la carga axial, la cual representa la columna de crudo que desplaza el sistema BCP hacia la superficie, por lo tanto cuando existe baja carga axial la producción también cae, así el yacimiento aporte en fondo de pozo. Por otra parte también se puede observar el estado operacional del sistema BCP en una escala de 0% a 100%, representando la operatividad del sistema BCP, tomando en cuenta la producción estimada y el torque en la sarta de cabillas, se calculó que el sistema estuvo, en promedio, a un 55,41% de su operatividad en el lapso de tiempo en el que fueron tomados los datos de las variables medidas. También se observa una oscilación debido a la falta de control a nivel del variador de frecuencia para controlar el torque en las cabillas en función de la producción estimada, por esto se hace necesario la implementación de un sistema de control inteligente que mantenga la operatividad del sistema en niveles aceptables sin llegar a provocar daños en el sistema BCP. Como se puede apreciar en la Figura 11 de la salida del

sistema difuso jerárquico, en cuanto al estado operacional del sistema BCP, se observa que el sistema mantuvo una operatividad oscilante, esta operatividad va enfocada al desempeño del sistema en cuanto a producción y estado de la bomba en fondo de pozo, este estado se ve reflejado directamente en el torque.

## V. CONCLUSION

El uso de sistemas híbridos para la estimación de variables es de gran interés por el bajo costo requerido para su implementación, y además, por la gran disponibilidad actual de sistemas de adquisición de datos y bases de datos históricas, que aportan los datos requeridos para el diseño de estos sistemas.

El sistema de modelado matemático desarrollado para el diagnóstico de pozos de extracción por bombeo de cavidades progresivas, estima la carga axial en la sarta de cabillas como un sensor virtual, y también infiere producción de crudo del sistema y el estado operacional del sistema BCP. Empleando un sistema difuso jerárquico, a partir de las variables medidas en superficie, tales como presión del casing, presión de cabezal, y además con la presión de fondo fluyente y el cálculo del torque.

La aplicación de lógica difusa en la inferencia de variables operacionales tales como producción y el estado operacional del sistema BCP brinda un soporte esencial a la hora de tomar acciones de optimización y control del sistema así como también proporciona una estimación para la realización del diagnóstico de fallas en el sistema a través del conocimiento del personal de campo.

La herramienta inteligente desarrollada tiene una gran aplicabilidad operacional y permite obtener resultados satisfactorios y precisos para el diagnóstico del estado operacional de un sistema BCP a partir de las variables inferidas y medidas en campo.

## REFERENCIAS

- [1] R. Ronning, "Automatic Start-up Control of Artificially Lifted Wells" Master of Science in Engineering Cybernetics. Norwegian University of Science and Technology, 2011.
- [2] E. Camargo and J. Aguilar, "Intelligent Well Systems", 2015 Asia-Pacific Conference on Computer Aided System Engineering, pp. 13-18, 2015.
- [3] J. Chirinos, Método de Diagnóstico de Fallas en el Sistema de Levantamiento Artificial por Bombeo de Cavidad Progresiva. Revista arbitrada venezolana del Núcleo LUZ-Costa Oriental del Lago, Universidad del Zulia, Venezuela 2013.
- [4] E. Camargo and J. Aguilar, "Advanced Supervision of Oil Wells Based on Soft Computing Techniques" Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research, Vol. 4, No. 3, pp.215-225, 2014.
- [5] E. Camargo, J. Aguilar, A. Ríos, F. Rivas and J. Aguilar Martin, Diseño de un Sensor Virtual Aplicado a Procesos de Petróleo. Artículo aceptado en el congreso iberoamericano de ingeniería mecánica, Chile 2016.