

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

REVISIÓN DE LOS MECANISMOS DE PRODUCCIÓN PETROLERA EN EL CAMPO CERRO NEGRO

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Para optar al Título de Ingeniero de Petróleo
Por el Br. Solórzano Cipriano Antonio

Caracas, Noviembre de 2003

Caracas, Noviembre de 2003

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado Designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería de Petróleo, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Cipriano Antonio Solórzano, titulado:

**“REVISIÓN DE LOS MECANISMOS DE PRODUCCIÓN PETROLERA EN EL
CAMPO CERRO NEGRO”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios conducente al Título de Ingeniería de Petróleo, y sin que ello signifique que se hacen solidarios de las ideas expuestas por el autor, lo declaran **APROBADO**.

Prof. Víctor Escalona

Coordinador

Prof. Luis Norberto Bueno

Jurado Principal

Prof. Freddy Paz

Jurado Principal

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

REVISIÓN DE LOS MECANISMOS DE PRODUCCIÓN PETROLERA EN EL CAMPO CERRO NEGRO

Tutor Académico: Víctor Escalona

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Para optar al Título de Ingeniero de Petróleo
Por el Br. Solórzano Cipriano Antonio

Caracas, Diciembre de 2003

DEDICATORIA

En memoria de todos aquellos cuyo recuerdo
habita en mi corazón, en especial a
mi padre Cipriano Characo,
mi tío Juan Solórzano,
mi amigo Ramón Martínez y Aurea Estela Rojas
quien en algún tiempo de mi vida
me hizo sentir lo que es el verdadero amor; y
la pureza y el misterio que el encierra.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente a Dios Padre Todopoderoso, que con su infinita misericordia me ha hecho el milagro de graduarme en la mejor Universidad del país: la UCV.

A mi mama Margarita y a mi mama Honoria quienes con su paciencia y amor han sabido esperar este momento.

A mi querida y siempre recordada Universidad Central de Venezuela, Alma Mater que no solo me ha transformado intelectualmente, sino también que me ha capacitado para desarrollar cualquier actividad que requiera trabajo y dedicación. A mi Escuela de Ingeniería de Petróleo, baluarte de Profesionales de gran formación Académica y humana de este país.

A todo el cuerpo profesoral, en especial a los Profesores: Víctor Escalona, Cesar Pieve (+), Henry Pino, María Teresa Vives, Norberto Bueno, Martín Essinfeld, Freddy Paz y Edgar Parra. A mis hermanos Wileima y Cruz Rafael Itriago, por haberme ayudado y creído en mí a lo largo de este camino tan difícil. A mis hermanas y hermanos: Tere, Caro, Teresa, María Helena, Andreina, Mónica, María Carolina, Sarai, Laura, Adriana, Edwin, Cesar, mis primos y sobrinos, Zaremis González y familia, América Zapata y flia y finalmente a Guillermo Prieto y flia.

A todo el equipo integrado del Servicio de Apoyo técnico de PDVSA Bitor, en especial a los ingenieros Jesús Pacheco e Isaac Benzaquen, que con la colaboración desinteresada de su parte se logró la culminación de este trabajo especial de Grado. Al Ingeniero Jesús Carrillo por su colaboración clave y definitiva en el desarrollo de esta tesis y a la señora Elba Paredes, por su inmensa bondad y solidaridad a lo largo de mi estadía en su casa. A Adaluc, Nelsi, José Miguel, Javier Guillen, Sergio Rodríguez, Rafael Tarache, Enzo Alvarez y Ciro Ron por su gran amistad y a todas aquellas que estuvieron pendientes de mí a lo largo de mi carrera universitaria.

Solórzano, Cipriano A.

REVISIÓN DE LOS MECANISMOS DE PRODUCCIÓN PETROLERA EN EL CAMPO CERRO NEGRO

Tutor Académico: Prof. Víctor Escalona. Tesis. Caracas. U.C.V.
Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Petróleo.
Año 2003. 147 Págs.

Palabra Clave: Métodos de Producción, Criterios de Selección,
Jerarquización, Curvas de Valoración, Cerro Negro

La declinación irreversible y rápida del Flujo natural en la inmensa cantidad de pozos y yacimientos en nuestra Industria Petrolera, nos hace inferir que la implementación de mecanismos de Levantamiento Artificial sea considerada Prioridad de Estado. Ello constituye un desafío enorme al desarrollo tecnológico y científico de nuestro país, como consecuencia de que las mayores reservas de crudo después de las de Rusia con respecto a crudos pesados y extrapesados, son las de Venezuela.

Con el objetivo principal de diseñar, dentro de esa prioridad, la solución a este reto se ha implementado en esta tesis la respuesta a esa visión futurista de nuestra industria. El objetivo principal de esta tesis es La Revisión de los Mecanismos de Producción petrolera en el campo Cerro Negro. Mediante un estudio descriptivo profundo, y soportado por un trabajo de campo, se ha buscado como Objetivos Específicos realizar una revisión bibliográfica acerca de los criterios que aplican a la selección de sistemas en el Campo Cerro Negro, aplicar la Metodología de Generación de Familia Coherente de Criterios, generar la Jerarquización de estos, diseñar las curvas de valoración para los criterios y finalmente comparar las metodologías existentes en la actualidad para realizar la comparación de los mecanismos de producción petrolera. Se busca de manera singular la condición más eficiente y óptima de conseguir respuestas a los planteamientos de cambio o continuidad en los sistemas de levantamiento artificial que operan en la zona de Cerro Negro. El uso de La “Metodología para el Diseño de una Familia Coherente de Criterios para la Selección de Sistemas de Levantamiento Artificial” para tal fin, ha permitido mediante un procedimiento metodológico fácil y rápido la generación de los criterios que rigen los principales sistemas de levantamiento artificial usados en el Campo Cerro Negro a saber: BCP, BES y Bombeo Mecánico. Se obviaron criterios que involucrarán variables económicas, pero es sabido que estas últimas estuvieron implícitas en las respuestas dadas por el equipo de expertos consultados. Dentro de las principales conclusiones están: ***La Metodología evaluada permite de una manera sencilla, rápida y objetiva la adaptación a la realidad del Campo Cerro Negro la aplicación de nuevas tecnologías, además de dar respuestas al Área de toma de decisiones, las Curvas de Valoración y los Criterios conseguidos sirven de referencia confiable y finalmente que la principal deficiencia es que el carácter subjetivo de la metodología la convierte en su principal debilidad.***

INDICE

CAPITULO I

RESEÑA HISTORICA	1
------------------------	---

CAPITULO II

EL PROBLEMA	6
-------------------	---

CAPITULO III

METODOS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL.....	11
1.1. BOMBEO MECÁNICO.....	12
1.1.1 Funcionamiento	12
1.1.2 Equipos de Subsuelo	13
1.1.3 Tipos de Bomba de subsuelo	13
1.1.4 Equipo de Superficie.....	16
1.1.5 Ventajas	17
1.1.6 Limitaciones.....	17
1.2. BOMBEO DE CAVIDADES PROGRESIVAS.	17
1.2.1 Principio.....	18
1.2.2 Funcionamiento	19
1.2.3 Rango de Operación.....	21
1.2.4 Equipo de superficie.	22
1.2.5 Equipo de Subsuelo.....	22
1.2.6 Ventajas	24
1.2.7 Limitaciones.....	25
1.3. BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE.....	25
1.3.1 Equipos de Superficie.	27
1.3.2. Equipos de Subsuelo.....	28
1.3.2.1 Clasificación de las bombas	29
1.3.2.2 Eficiencia de la bomba	31
1.3.3 Ventajas	32
1.3.4 Limitaciones	32
1.4. BOMBEO HIDRÁULICO	32
1.5. ALGUNOS DE LOS FACTORES QUE AFECTAN LA ESCOGENCIA DE LOS SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL EN EL ÁREA DE CERRO NEGRO	35
1.6 METODOLOGÍAS PARA LA SELECCIÓN DE SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARITIFICIAL.	40
1.6.1 Modelo 1- SEDLA - Sistema Experto de Levantamiento Artificial.....	41
1.6.1.1 Sistemas Expertos. Generalidades.....	41
1.6.1.2 Estructura Básica de los Sistemas Expertos	42
1.6.1.3. Aplicaciones en el Área de Levantamiento Artificial	45
1.6.1.4 Descripcion General del Sistema.....	45
1.6.1.5 Metodos de Levantamiento Artificial que comprende el Sistema.....	48
1.6.1.6 Modulos del Sistema	49
1.6.2 MODELO 2 - DMSOLA (PAJ y MCCV).....	58

1.6.2.1	Proceso Analítico Jerárquico.....	58
1.6.2.2	Descripción del Método.....	59
1.6.1.3	La Escala de Comparaciones.....	60
1.6.1.4	Ventajas y Limitaciones del Método.....	62
1.6.1.5	Metodo de Curvas de Valoracion (mcv).....	64
1.6.1.6	Descripción del Método.....	64
1.7	SEMEJANZAS Y DIFERENCIAS ENTRE MÉTODOS DE CURVAS DE VALORACIÓN Y MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN DE CURVAS DE VALORACIÓN.....	65
1.7.1	LA ESCALA DE COMPARACIÓN	67
1.7.2	ANALISIS Y DISCUSION DEL MODELO 2.....	68

CAPITULO IV

2.1	GENERALIDADES.....	73
2.2	FORMA DE LA INVESTIGACIÓN	73
2.3	TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	73
2.4	POBLACIÓN Y MUESTRA	75
2.5	TECNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.	75
2.5.1	Confiability y validez.....	78
2.5.2	Técnicas de Análisis.....	79
2.6	MATRIZ METODOLÓGICA.....	79

CAPITULO V

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	86
----------------------------------	----

CAPITULO VI

CONCLUSIONES.....	109
-------------------	-----

CAPITULO VII

RECOMENDACIONES	112
-----------------------	-----

BIBLIOGRAFIA	112
--------------------	-----

APENDICES.....	116
----------------	-----

LISTA DE ILUSTRACIONES

	Pág
Figura 1.1.1. Etapas de funcionamiento de una bomba de Subsuelo.....	12
Figura 1.1.2. Principales Elementos de una Bomba de Bombeo Mecánico.....	14
Figura 1.1.3 Cabillas de Fibra de Vidrio.....	15
Figura 1.1.4 Balancín Convencional.....	16
Figura 1.1.5 Prensa-estopa Barra Pulida.....	17
Figura 1.2.1 Componentes de un Sistema de Cavidades Progresivas.....	24
Figura 1.3.1 Completación Típica para el Bombeo Electrosumergible.....	26
Figura 1.3.2 Esquemas de una Etapa.....	30
Figura 1.6.1 Sistema Expertos y Programas Convencionales.....	43
Figura 1.6.2 ventana del Resultado del Sistema Experto SEDLA.....	44
Figura 1.6.3 Esquema del Modulo de Preselección Técnica del SEDLA.....	50
Figura 1.6.4 Esquema de Ventana de salida del módulo de Evaluación Económica.....	54
Figura 1.6.5 Esquema del Modulo de Evaluación Económica del SEDLA.....	54
Figura 2.1.1 Resumen de la Metodología de una Familia Coherente de Criterios para la Selección de Sistemas de Levantamiento Artificial.....	84
Figura 3.1.1 Gráfico de Jerarquización de Criterios para el Bombeo Mecánico.....	100
Figura 3.1.2 Gráfico de Jerarquización de Criterios para el Bombeo de Cavidades Progresivas.....	102
Figura 3.1.3 Gráfico de Jerarquización de Criterios para el Bombeo Electrosumergible.....	104
Figura 3.1.4 Curvas de Valoración Para BM.....	105
Figura 3.1.5 Curvas de Valoración Para BCP.....	106
Figura 3.1.6 Curva de Valoración para BES.....	107

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.6.1 Escala de Prioridades Empleadas en el Proceso Analítico jerárquico.....	60
Tabla 1.6.2. Situaciones de Preferencias y Relaciones Binarias Asociadas.....	65
Tabla 1.6.3. Escala de Calificación para la Obtención de las Curvas de Valoración.....	69
Tabla 4.1.1 Relación entre las Preguntas formuladas en el Cuestionario y los Objetivos Específicos	80
Tabla 4.1.2 Matriz Metodológica Desarrollada.....	82
Tabla 5.1.1 Resultados de la consulta a Expertos a pregunta Nro. 1 con respecto al Bombeo Mecánico.....	90
Tabla 5.1.2 Resultados de la consulta a Expertos a pregunta Nro. 2 con respecto al Bombeo de Cavidades Progresivas	92
Tabla 5.1.3 Resultados de la consulta a Expertos a pregunta Nro. 3 con respecto al Bombeo Electrosumergible.....	94
Tabla 5.1.4 Pesos respectivos para el Bombeo Mecánico.....	99
Tabla 5.1.5 Pesos respectivos para el Bombeo de Cavidades Progresivas.....	101
Tabla 5.1.6 Pesos Respectivos para el Bombeo Electrosumergible.....	103



**RESEÑA
HISTORICA**

RESEÑA HISTORICA

La declinación de la producción de Petróleo es en la actualidad, un desafío a la Industria Petrolera Mundial. La disminución acelerada del potencial de producción afecta no solo a las multinacionales del negocio petrolero, sino también a países donde la estructura económica se sostiene de la exportación de materias primas como es el caso de nuestro país.

En tal sentido, los esfuerzos por aumentar el factor de recobro de petróleo se han orientado hacia la implementación de nuevas tecnologías, en aras de incrementar los niveles de productividad de la actividad petrolera. Es en ese momento cuando cobra fuerza un movimiento orientado a la optimización de los sistemas de levantamiento artificial.

Por más de tres décadas, los intentos para establecer un patrón de Selección de Sistemas de Levantamiento Artificial se han convertido en un verdadero esfuerzo orientado no solo a mejorar la evaluación de los sistemas de producción petrolera, sino también para su implementación inédita en nuevos pozos.

Los métodos de levantamiento debían ser elegidos mediante un principio de selección. Es allí donde las ventajas comparativas de un Sistema respecto a otro se ha convertido en una de las premisas tomadas en consideración a la hora de seleccionar un sistema de levantamiento artificial.

Es allí donde germina el interés no solo por mejorar nuestros sistemas de levantamiento artificial, sino por el gran descubrimiento de inmensas reservas de crudos pesados y extrapesados en la Faja Bituminosas del Orinoco, que representaba y representa un inmenso reto tecnológico para nuestro país.

Ya para finales de la década del 70, Solís⁽¹⁾ había desarrollado, mediante técnicas de programación lineal, un patrón de Selección de Sistemas de producción petrolera comparando dos Sistemas de levantamiento basado en dos criterios de selección de los mismos. Este representa el primer Sistema de Selección de levantamiento basado en técnicas de programación computacional.

Fue en 1980 cuando Kermit Brown⁽²⁾, planteó la alternativa de Selección de Sistemas de Levantamiento Artificial mediante ventajas y limitaciones. En su “The Technology Artificial Mehods”, expone muy acertadamente las diferentes experiencias mundiales con nuevas tecnologías. Es esta obra, la referencia más importante en cuanto a la selección de sistemas de producción petrolera se refiere.

Es en la década de los 90, cuando INTEVEP reúne a un conjunto de expertos en varios Sistemas de producción petrolera, con el objeto de establecer un marco teórico de referencia. Es allí donde nació y se creó el S.E.D.L.A (Sistema Experto de Levantamiento Artificial), herramienta de inteligencia artificial que agrupa todos los conocimientos de grandes expertos a nivel mundial en Sistemas de Producción de Petróleo cuyo objetivo principal fue el análisis y estudio de todas las variables hasta entonces conocidas, implícitas en el diseño de Sistemas de Producción Petrolera. Él Sistema adolecía de adaptabilidad a los campos venezolanos, debido a su carácter generalizado y a las condiciones diferentes en los campos donde fueron evaluados los sistemas de producción petrolera.

Contemporáneamente en 1992, Víctor Escalona⁽³⁾ propone un modelo selección de Sistemas de levantamiento adaptable a Pozos o Yacimientos, basado en las consideraciones de una serie de parámetros comunes tomados en cuenta por los cinco métodos de producción más usados, estableciendo para estos diferentes pesos. La principal deficiencia de esta metodología fue el carácter subjetivo que deriva de asignar pesos a las variables.

Al año siguiente, Clegg, Bucaran & Hein Jr⁽⁴⁾, elaboran unas tablas donde hacen una medición relativa de factores que tienden a establecer ventajas de un método respecto a

otro. Estos factores agrupan a parámetros de diversa índole, económicos, ambientales, técnicos y operacionales.

Posteriormente en 1997, Escalona⁽⁵⁾ fundamentándose en las tablas de Clegg, Bucaran & Hein Jr., Brown y las experiencias en cuanto a tasa de producción, %A y S, RGP, API y barril de diluyente vs. Potencial del pozo diseña una metodología para la escogencia del método óptimo de producción adaptable al área de Cerro Negro, en el Sur del estado Monagas, mejorando notablemente la escogencia del método de producción en el área.

En el año 1999, Yamila Reyes(1999)⁽⁶⁾ realizó una actualización de la versión inicial del S.ED.L.A obteniéndose así un programa adaptado a la realidad de selección de Sistemas de Levantamiento Artificial, permitiendo así la revisión y evaluación de éstos en los diferentes campos venezolanos.

Ese mismo año Guisti⁽⁷⁾, define en su trabajo “Análisis, Evaluación y Selección de los factores que afectan la escogencia de levantamiento artificial en el área de Cerro Negro y Morichal”, los factores involucrados, así como los criterios de escogencia de los métodos de producción en un esfuerzo por detallar acertadamente todas las variables involucradas en la región nombrada, con el objeto de delimitar geográficamente y adaptar a la realidad de esos campos la selección de Sistemas de Levantamiento.

En el año 2000, Luis Silva (2000)⁽⁸⁾, en un esfuerzo en conjunto con la Escuela de Ingeniería de Petróleo realizó un software para la selección de un Sistema de Levantamiento Artificial, con la finalidad de reunir en esta herramienta todo el conocimiento en Ingeniería de Producción en la selección de los métodos con la realidad ofrecida por nuestros campos, para lograr una compatibilidad óptima entre el software y estos.

Finalmente, Carrillo (2002)⁽⁹⁾ realizó la elaboración de una metodología que permite comparar mediante la generación, depuración y Jerarquización de Criterios,, empleando un

procedimiento basado en el Conocimiento en Investigación de Operaciones desarrollado por Néstor Carrasquero y fundamentado en el trabajo realizado por Luis Silva, nombrado anteriormente. Es de notar que en ella se sintetiza 10 años de investigación en el área de Selección de Sistemas de Levantamiento iniciada en Venezuela, en la Universidad Central de Venezuela por el Prof. Víctor Escalona en el área de Producción, específicamente en el área de Selección de Métodos de Levantamiento Artificial.



EL PROBLEMA

EL PROBLEMA

Para Venezuela, en la actualidad, la explotación de crudos pesados y extrapesados en el área de la Faja Bituminosa ha cobrado una importancia estratégica, debido a las enormes reservas probadas y recuperables que posee (1 billón de barriles de petróleo en sitio)⁽¹¹⁾, y a la declinación preocupante de su potencial de producción anual, registrado a partir de finales de la década de los 70.

En este sentido, los esfuerzos de la Industria Petrolera deben ser orientados hacia la búsqueda de nuevas tecnologías que permitan conjugar el principio de “Máxima eficiencia a Menor costo”

Igualmente, los mecanismos involucrados en la selección de las nuevas tecnologías deben ofrecer una garantía, de confiabilidad y validez, que se traduzca en un esfuerzo en común de toda la Gerencia Integrada, es decir del manejo de equipos multidisciplinarios orientados a decisiones más acertadas y objetivas.

Es en esta última exposición donde cobran una importancia trascendental los Modelos para la Selección de los Sistemas de Levantamiento Artificial, los cuales son procedimientos y metodologías que proporcionan al usuario una forma de sugerir el Sistema de Levantamiento más adecuado y que garantice la optima explotación del crudo.

Los crudos presentes en la Faja Bituminosa del Orinoco, presentan condiciones de producción muy adversas, tales como alto contenido de azufre, vanadio y otros elementos, así como también se presenta alta producción de arena, esto requiere de gastos adicionales asociados al reacondicionamiento de pozos.

Es ahí donde nace la necesidad de plantear la siguiente interrogante: ¿Es posible implementar nuevas tecnologías que garanticen la explotación de crudos con un mínimo impacto ambiental, de mejor eficiencia técnica y menor costo en pozos en el área

perteneciente al campo Cerro Negro, y operadas en el oriente del país, precisamente en el sur de Monagas, en la Faja Bituminosa del Orinoco.

Ciertamente, las características ofrecidas por estos crudos y la inmensa cantidad de reservas probadas ofrecen un atractivo escenario para plantear la posibilidad de comparar las diferentes tecnologías existentes, para sugerir el método de producción más apropiado para un grupo de pozos.

El principal problema a resolver es el conocer las distintas condiciones de producción que se presentan en la Zona de Cerro Negro para un grupo de pozos en particular, identificar los distintos criterios y parámetros que son tomados en cuenta para la implementación de un sistema en un yacimiento y posteriormente evaluar la información técnica, dejando los criterios económicos como propuesta para otro estudio.

Dado a que en la zona, se han venido aplicando las técnicas de perforación y reperforación horizontal, en zonas pertenecientes al área de la Faja, en específico Cerro Negro “Inicialmente los pozos que fueron reperforados fueron completados con Bombeo Mecánico, sin embargo no se obtuvieron las tasa de producción estimadas de 600 BNPD..., en el campo Cerro Negro: 188 BNPD. Adicionalmente el bombeo mecánico presentó frecuentes fallas mecánicas, lo cual generó un índice promedio de 0,66 servicios por año para el campo Cerro Negro” (Guardiola, 1996 p.2)

Luego se busco mejorar el levantamiento Artificial, instalándose Bombas de Cavidad Progresiva lo cual mejoró la producción del Campo Cerro Negro a 332 BNPD, presentando frecuentes fallas debido al elevado contenido de aromáticos en los crudos que causaba la expansión de los elastómeros. (Op cit p.2)

Luego, “como una alternativa adicional se presentó el método de Bombeo Electrosumergible desde el año 1994, el cual fue aplicado en cuatro pozos... y CC-07 y CD-01 del Campo Cerro Negro. Este método ha permitido incrementar la producción promedio de un 89,7% para los dos campos” (Op. Cip, p.3)

Como consecuencia de lo anteriormente expuesto, se puede plantear el Objetivo General de este trabajo:

Las enormes Reservas de Petróleo de la Faja y las condiciones adversas de producción requieren de la Optimización de los Sistemas de Levantamiento Artificial en el área de Cerro Negro; Es necesario evaluar la factibilidad de la aplicación de las nuevas tecnologías, con un mínimo impacto ambiental, una alta rentabilidad y un mínimo costo en la selección de los sistemas de Levantamiento Artificial, combinando una alta rentabilidad con un mínimo costo en los mecanismos de producción petrolera del área de la Faja, campo Cerro Negro, mediante la comparación sistematizada basada en las ventajas y limitaciones que ofrece un sistema respecto a otro, para un grupo de pozos.

Los recursos con los cuales se logrará será la metodología diseñada y descrita por Carrillo, basado en el diseño de una familia coherente de criterios para la selección de sistemas de levantamiento artificial, donde enfoca de manera generalizada las distintas herramientas de selección de sistemas y aporta una manera metodológica para realizar la selección, todas ellas fundamentadas en la comparación sistemática de los criterios de selección que ofrece un sistema respecto a otro. Es necesario acotar que estas metodologías tienen sus preeminencias y limitaciones lo cual será objeto de análisis en la discusión de resultados.

La variable a optimizar será el Factor de Recobro de Petróleo, y nuestras variables dependientes son los denominados criterios, que son evaluados y comparados a través de herramientas tecnológicas como lo son los Software, en nuestro caso se hace uso de la metodología de una Familia Coherente de Criterios la cual permite generar los criterios y posteriormente jerarquizarlos mediante un estudio de campo donde se implementa un cuestionario y complementado con una exhaustiva investigación documental bibliográfica, en donde se consulta a expertos del área de yacimiento y de producción para la localización geográfica anteriormente delimitada, de donde como consecuencia de esto se desprende nuestros objetivos específicos:

- Realizar una revisión bibliográfica acerca de los criterios que aplican al Campo Cerro Negro

- Aplicar la Metodología de Generación de Familia Coherente de Criterios para generar criterios.

- Generar la Jerarquización de los Criterios involucrados en la Selección de Mecanismos de Producción Petrolera en el campo Cerro Negro.

- Generar las Curvas de Valoración de referencia en el campo a partir de la consulta a expertos.

- Comparar y analizar los Sistemas de Levantamiento Artificial a partir de la Metodología planteada.

Es de hacer notar, que al determinar la familia de Criterios adaptados a la zona señalada, se permite establecer un patrón que soporte técnicamente la Selección de un Sistema de Levantamiento en determinados grupos de pozos, a través de metodologías distintas que refuercen la posible implementación de estos.

Finalmente, la preocupación ya evidenciada por Juan Pablo Pérez Alfonso es quizás, el argumento más elocuente de justificación e importancia de este trabajo: “Naturalmente advertía, nuestro desarrollismo llega a los extremos de querer extraer el petróleo de la faja, es posible que tengamos que desarrollar o buscar nuevas tecnologías” (García, 1981, p.35). Creo que esta expresión reflejaba hace ya 28 años lo que reclama actualmente nuestra industria.

**MARCO
TEÒRICO**

METODOS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL

Los mecanismos de producción petrolera comprenden una serie de procesos que integran el comportamiento en los alrededores del pozo (comportamiento de afluencia), el levantamiento de los fluidos del pozo a través de la tubería de producción, hasta los procesos de superficie como son: recolección, separación, tratamiento, almacenamiento y finalmente transporte de crudo. El levantamiento del crudo desde el pozo hasta la superficie puede llevarse a cabo mediante producción del pozo por flujo natural o mediante la instalación de levantamiento artificial.

Inicialmente cuando un pozo es producido, la energía natural es el mecanismo por excelencia para impulsar los fluidos desde un punto del yacimiento hasta el fondo del pozo, y desde el fondo del pozo hasta la superficie, se dice en estas condiciones que el pozo se produce por Flujo Natural.

A medida que el yacimiento en el tiempo es producido, la producción del pozo declina como consecuencia de la disminución de la presión del pozo, ocasionando que el crudo fluya hasta cierta altura dinámica, pero no hasta la superficie, por lo que se hace necesaria la instalación de un sistema alternativo que comunique la energía adicional que el yacimiento ya no es capaz de aportar para que complemente el proceso de producción. Es allí donde nace la necesidad de implementar un sistema de levantamiento artificial.

Es por ello que es de vital importancia, todo el desarrollo tecnológico hoy día presentado en el área de Ingeniería de Producción con respecto a las distintas alternativas existentes de mecanismos de levantamiento artificial, basado en la experiencia mundial que se ha tenido de estos y a la adaptabilidad de ellos a condiciones preferenciales o ideales de instalación a un pozo en particular.

La experiencia en el Área de Cerro Negro fue establecida a partir de las filiales Maraven y Corpoven, las cuales implantaron Sistemas de Levantamiento Artificial alternativos al más

antiguamente usado, como lo es el Bombeo Mecánico. Las mejores experiencias en estos métodos han sido las realizadas con Sistemas de Bombas electrosumergibles y Bombas de Cavidad Progresiva. A continuación presentamos un resumen de las configuraciones mecánicas de estos, así como también una descripción detallada de los distintos componentes de los mismos.

1.1.BOMBEO MECÁNICO.

Este es el método de levantamiento artificial más usado en la Industria Petrolera en el ámbito mundial, tanto para crudos pesados como para los extrapesados.

Consiste en la instalación de una bomba de subsuelo de acción recíprocante que es abastecida con energía transmitida a través de una sarta de cabillas; esta energía proviene a su vez de un motor eléctrico o de combustión interna el cual moviliza la unidad de superficie mediante un sistema de engranajes y correas.

1.1.1. Funcionamiento:

En la figura 1.1.1 se muestra el comportamiento de cargas en función del desplazamiento del pistón. La carga se transfiere de la tubería de cabillas. La válvula viajera está cerrada y soporta todo el peso del fluido en la tubería de producción, mientras que la válvula fija está comenzando a abrirse para dejar pasar el fluido del pozo a la bomba. Esta situación ocurre inmediatamente al comienzo de la carrera o recorrido ascendente del pistón.

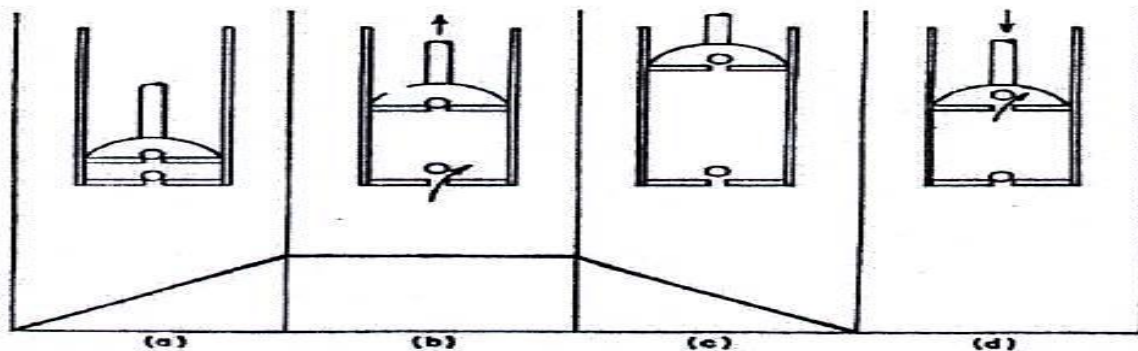


Figura 1.1.1 Etapas en el funcionamiento en una Bomba de Subsuelo.

Figura 1.1.1

En la figura I.1.1-(b) el pistón se mueve hacia arriba levantando la carga total de la columna de fluido. La válvula viajera permanece cerrada mientras que la válvula fija permanece abierta. En estas condiciones la presión debida al nivel de fluido en el revestidor actúa directamente sobre la parte inferior del pistón.

La figura I.1.1-© ilustra el extremo superior del recorrido del pistón en la cual la carga es transferida de la bomba a la tubería de producción; la válvula viajera empieza a abrirse y la válvula fija comienza a cerrarse.

Finalmente la figura I.1.1-(d) muestra el pistón en su recorrido descendente moviéndose a través del fluido contenido en el cilindro de la bomba. La válvula viajera permanece abierta y la fija cerrada. La carga final en esta etapa es igual a cero. Una vez concluida esta etapa el ciclo se repite sucesivamente.

Este método esta compuesto por dos componentes que son los equipos de superficie y el equipo de subsuelo.

1.1.2 Equipos de Subsuelo:

Este es como su nombre bien lo indica, el equipo que se instala en el pozo, a nivel de subsuelo, en la figura 1.1.2 podemos ver sus componentes los cuales son:

1. La bomba: Controla el resto del diseño de una instalación de bombeo mecánico para un pozo ya que de su tipo, tamaño y ubicación dependerá la selección del resto de los componentes. Está formada por los siguientes elementos:

a) **El Cilindro o Barril:** La parte dentro de la cual se mueve en su recorrido de ascenso y descenso. Su largura se predetermina por la carrera máxima del pistón y su dureza deberá resistir la acción abrasiva del pistón.

c) **El émbolo o Pistón:** La parte móvil que succiona y desplaza el líquido. En él se encuentra la válvula viajera que controla la entrada de fluidos de la bomba al interior del pistón.

d) **La Válvula Viajera:** Dispositivo ubicado dentro del pistón, está conformado por una esfera de acero y su respectivo asiento. Permite la entrada de fluidos al pistón en su carrera de descenso y hace un sello hermético en su carrera de ascenso.

e) **La Válvula Fija:** Dispositivo similar a la válvula viajera ubicado en la base del barril. Permite la entrada de fluidos a la bomba en la carrera de ascenso del pistón y hace un sello hermético en la carrera de descenso.

2. Las Cabillas: Las cabillas de succión conectan el pistón de la bomba con la unidad de bombeo en la superficie. Tiene como función transferir energía, soportar cargas y accionar el pistón de la bomba. Existen clases y, entre las más conocidas, se tienen: Las cabillas convencionales, las continuas y las de fibra de vidrio (Fig. I.1.3). Las Cabillas de mayor uso son las convencionales que se fabrican en longitudes de 25' a 30' y que pueden ser instaladas en combinación de dos y tres diámetros distintos dependiendo de: La profundidad de la bomba, el tamaño de la tubería de producción, la tasa de producción y las características de los fluidos a ser bombeados.

3. Ancla de Tubería: Es una empackadura especial que sirve para anclar la tubería al revestidor de producción, reduciendo la contracción y el alargamiento de la ocasionada por la carrera de ascenso y descenso del pistón.

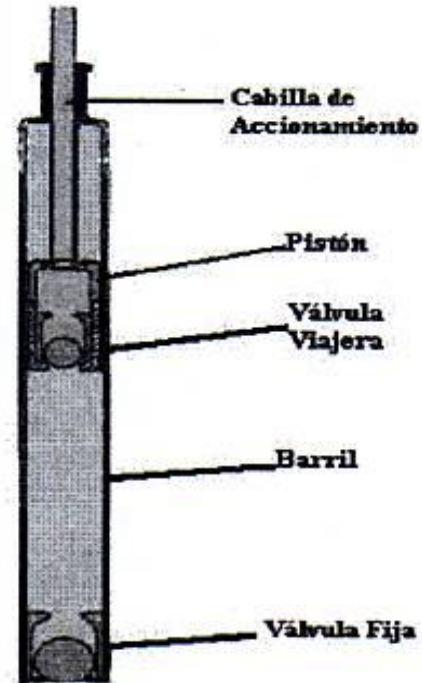


Figura I.1.2. Principales Elementos de una Bomba de Bombeo Mecánico

4. Ancla de gas: Es un tubo perforado en su parte superior que se coloca debajo de la bomba. Su función principal es la separación del gas que viene asociado al crudo.

1.1.3 Tipos de bomba de subsuelo:

Las bombas de subsuelo se clasifican en dos grupos principales: Las de tubería y las de inserción:

- a) Las de tubería: Deben su nombre a que su cilindro o barril se enrosca en, y forma parte integral de la sarta de la tubería de producción. Generalmente, estas bombas se utilizan a profundidades menores que 5000' en pozos de alta productividad de crudo, baja productividad de gas y en ausencia de fluidos abrasivos (arena) o corrosivos.
- b) Las de inserción: El ensamblaje completo de la bomba, incluyendo el cilindro o barril, se baja colgando al final de las cabillas y se asienta en un dispositivo especial para tal fin, ubicado dentro de la tubería de producción. Normalmente las bombas de inserción se utilizan a profundidades hasta 7000' y de pozos de mediana o baja productividad. Este tipo de bomba tiene la obvia ventaja que ella entera se puede remover para su separación o reemplazo con un mero trabajo de cabillero, sin tener que utilizar una cabria para extraer toda la sarta de tubería de producción.

Los criterios principales de selección de estos tipos de bombas de subsuelo son: Profundidad de operación, tipos de fluidos, productividad del pozo, temperatura de los fluidos y costos.



Figura I.1.3 Cabilla de Fibra de Vidrio

1.1.4 Equipo de Superficie:

La unidad de superficie transmite la energía desde la superficie hasta el fondo del pozo, donde se encuentra ubicada la bomba de subsuelo, con el fin de elevar los fluidos hasta la superficie. Esto se puede apreciar en la figura I.1.3. Estas unidades se dividen en: Unidad de balancín y una Unidad hidráulica.

a) Unidad de Bombeo o Balancín: Su función principal es proporcionar el movimiento recíprocante apropiado con el propósito de accionar la sarta de cabillas y consecuentemente a la bomba de subsuelo. El diseño de la unidad de balancín presenta tres aspectos esenciales. Está conformada por los siguientes componentes:

b). Sistema reductor de velocidades: El cual utiliza para convertir la energía del movimiento rotacional sometido a las altas velocidades del motor primario a energía de movimiento rotacional de baja velocidad.

c) Sistema de articulación: Esta tiene por objeto trasladar el movimiento rotatorio primario a movimiento recíprocante, lo cual se lleva a cabo a través de la manivela-viga-balancín.

d) Sistema de Contrapeso: Proporciona una distribución equilibrada de las cargas durante el ascenso y el descenso a fin de reducir la potencia máxima efectiva y el momento máximo rotacional. Algunas unidades utilizan el contrapeso en el balancín, otras utilizan cilindros de aire comprimido para compensar las cargas en ambas carreras.

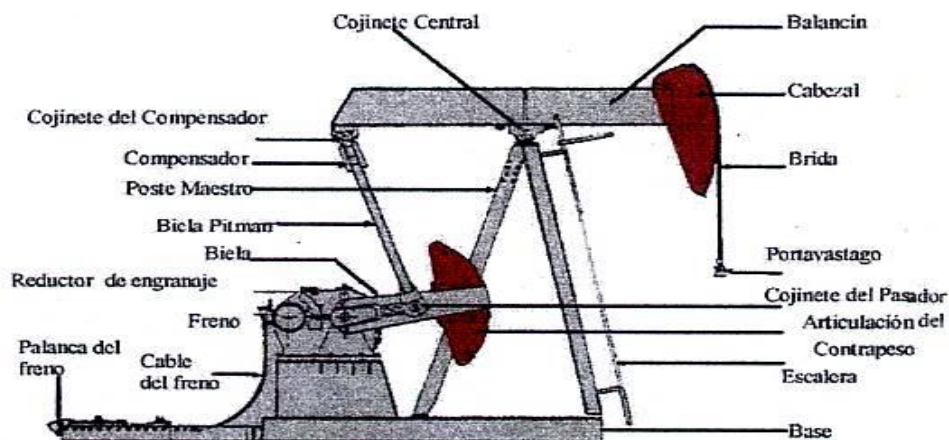


Figura I.1.4 Balancín Convencional.

2.Barra Pulida: Dispositivo de acero que conecta el tope de la sarta de cabillas a la cabeza del balancín. (Fig. 1.1.4)

3.Prensa estopa: Artefacto que forma el sello entre la barra pulida y el tope de la tubería de producción evitando derrame de crudo.(Fig.1.1.5)

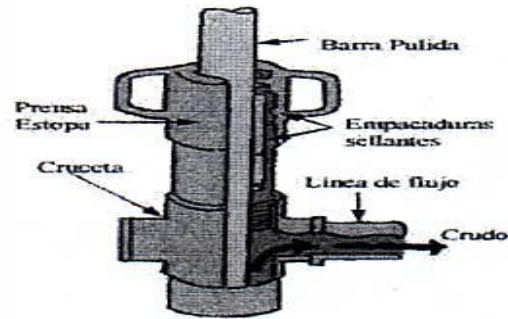


Figura I.1.5 Prensa Estopa y Barra Pulida

1.1.5 Ventajas:

Entre las ventajas que ofrece este sistema de levantamiento artificial se tiene:

1. Fácil manejo.
2. Requiere mínimo mantenimiento.
3. Usadas en diversas condiciones de bombeo en las que la confiabilidad, la reciedumbre y la sencillez son factores primordiales.
4. La unidad de balanceo mecánico (pesas) no se repara.

1.1.6 Limitaciones:

Las principales limitaciones que tiene este método son:

- 1.No logran balances correctos.
- 2.Se requiere de una cuadrilla para su balanceo.
- 3.Su elevado peso dificulta el manejo.
- 4.Altos costos de transporte y de Instalación.

1.2 BOMBEO DE CAVIDADES PROGRESIVAS.

La Bomba de Cavidad Progresiva se ha utilizado durante años como bomba de transferencia de fluidos. Su diseño consiste de un rotor helicoidal sencillo, rotando

excéntricamente dentro de un estator helicoidal elástomérico. La viscosidad del fluido y la compresión ubicada entre el estator y el rotor, son dos factores determinantes del efecto de deslizamiento. Al compararse con otros métodos de levantamiento artificial de similar aplicación, este se considera el método más eficiente debido a su bajo costo de inversión, facilidad de instalación y mínimo mantenimiento.

Las Bombas de Cavidades Progresivas son un tipo especial de bombas de desplazamiento positivo rotatorio, en el cual, el fluido es transportado entre los filamentos de tornillo del rotor y desplazado axialmente mientras el tornillo rota. Estas bombas mantienen un continuo volumen de líquido en las cavidades, entre la succión y la descarga, mediante la acción y el posicionamiento de los elementos de la bomba. Debido a estas características, la BCP tiene la habilidad de bombear fluidos viscosos, abrasivos, multifásicos y gaseosos en un amplio rango de tasas de flujo y diferenciales de presión. Ellas también exhiben una baja inercia rotacional y tiene baja velocidad interna de los fluidos, lo cual minimiza la agitación de los mismos.

1.2.1 Principio:

La Bomba de Cavidad Progresiva también llamada “Bomba de Monieau” se basa en el principio de tornillo de Arquímedes; Consiste en dos hélices, una dentro de la otra, con lo que constituye un engranaje helicoidal:

- El rotor, de metal, constituye la hélice interna y es sencilla.
- El estator, constituye la hélice exterior una doble hélice con una longitud del doble del recorrido del rotor en un giro.

El rotor, el cual es el componente interno rotatorio de la bomba, está unido y es movido por la sarta de cabillas. Este está construido con un acero de alta resistencia en forma de una hélice sencilla. En la mayoría de los casos, el rotor es revestido con una capa de un material resistente al desgaste, usualmente cromo, para resistir la abrasión y reducir la

fricción entre el rotor y el estator. El estator, el cual comprende el componente externo de la bomba, está unido a la tubería de producción, permaneciendo estacionario durante el bombeo. El estator es de un acero tubular con un núcleo de elastómero fijo por dentro. El elastómero es moldeado en forma de una hélice con una longitud de paso a dos veces la del rotor. Dependiendo de la condición química y el proceso de elaboración del elastómero fijo por dentro, las propiedades físicas y químicas del material pueden variar considerablemente.

La rotación de la sarta de cabillas en la superficie por medio de un motor de combustión interna o eléctrica, gira el rotor dentro del estator fijo, causando que el fluido suba hacia la superficie.

1.2.2 Funcionamiento:

La geometría del ensamblaje es tal que constituye una serie de cavidades separadas, pero idénticas. Cuando el rotor gira dentro del estator, estas cavidades se mueven axialmente de una punta del estator a la otra, es decir, de succión de descarga, creando la acción de bombeo. De aquí el nombre de “cavidad progresiva”.

Cuando el rotor es posicionado dentro del estator, se forma una serie de cavidades idénticas, pero separadas cavidades de fluido. Cada una de estas cavidades tiene una longitud de un paso del estator alrededor de la parte exterior del rotor, en el cual, una cavidad comienza donde la otra termina. En cualquier sección transversal de la bomba, el número de cavidades separadas es siempre una más que el número de lóbulos del rotor.

El movimiento del rotor dentro del estator, es una combinación de dos movimientos: Una rotación del rotor sobre su propio eje en el sentido de las agujas del reloj, y una rotación del rotor excéntricamente alrededor del eje estator, en el sentido opuesto a las agujas del reloj, la combinación de la geometría de la bomba y este movimiento, resulta en la formación de cavidades moviéndose axialmente desde la succión hasta la descarga de la bomba.

Cuando el rotor completa una revolución, el volumen contenido entre el rotor y el estator es desplazado por un paso del estator. Esta bomba entrega un flujo continuo y uniforme, debido a que el área de esta cavidad entre el rotor y el estator permanece constante a lo largo de todas las secciones transversales de la longitud de la bomba. El desplazamiento de la bomba está definido como el volumen de fluido producido por cada revolución del rotor.

El desplazamiento de una bomba sencilla, es función de la excentricidad de la bomba, diámetro del rotor y la longitud del paso del estator, por medio de la siguiente expresión:

$$V=0,594.e.D.P_r$$

V= Desplazamiento de la Bomba.(Bls/día/rpm)

E= Excentricidad de la Bomba (Plgs.)

D=diámetro del rotor (plgs.)

.P_r =Paso del rotor (Plgs).

La tasa de flujo teórica de una Bomba de Cavidad Progresiva es directamente proporcional al desplazamiento y a la velocidad de rotación, y puede ser determinada por:

$$Q_{teórico} = V.N$$

Donde:

V=desplazamiento de la bomba. (Bls/día)

N=velocidad de la rotación (rpm.)

Q_{teórico}= Tasa de flujo teórica (Bls/día)

Sin embargo, durante la operación con presión diferencial a través de la bomba, algo de fluido se puede deslizar o escurrir a través de las líneas de sello de las cavidades, causando una reducción en la tasa de flujo. Como resultado, la tasa de flujo real o capacidad de una BCP es la diferencia entre la tasa de flujo teórica y la tasa de escurrimiento.

La tasa de escurrimiento depende del ajuste entre el rotor y el estator, las propiedades del elastómero, viscosidad del fluido y la presión diferencial de la bomba.

1.2.3 Rango de Operación

A) **Tasa de producción y capacidad de levantamiento:** la tasa de producción entre bajas tasas hasta tasas de 2500 BFPD. La capacidad de levantamiento cubre rangos que van desde 2000 pies hasta 6600 pies, dependiendo del tipo y tamaño de la bomba.

B) **Tipos de flujos:** Se maneja una variedad de fluidos, tanto en la industria del gas como del petróleo. Hasta categorías que tienen fluidos desde viscosidades muy bajas hasta las más altas, con 100% de crudo a 100% agua, incluyendo cantidades limitadas de H₂S. Debido a sus componentes resistentes a la abrasión, también manejan fluidos con contenidos de arena. Se recomienda para crudos pesados, extrapesados y medianos, que abarquen un rango entre 8 y 21° API, y con bajo contenido de aromáticos. En cuanto al gas, maneja cantidades limitadas de fluidos con gas, que no contengan una RGP mayor a 1000 PCN/BN debido a que el gas tiende a hinchar los elementos elastoméricos en la bomba, causando daños internos y restringiendo el paso de los fluidos.

C) **Temperatura:** Lo limitante en este parámetro es el material del estator. En este momento, la temperatura máxima recomendada es de 120°C (250°F), en fluidos no abrasivos y 90° C (200°F), en fluidos abrasivos.

D) **Tamaño del revestidor:** En este rubro, se propone utilizar revestidores de 4 ½ pulgadas y 5 ½ pulgadas, porque las bombas en existencia operan eficientemente con este tamaño.

E) **Tamaño de la tubería:** a limitación aquí se encuentra en la compatibilidad bomba-cabillas-tubería: Es imprescindible que el diámetro interno de la tubería sea suficiente para permitir el movimiento excéntrico de la conexión rotor-cabillas.

F) **Desviación del pozo:** No existe una restricción alguna en cuanto a la desviación del pozo, sin embargo se acostumbra utilizar centralizadores durante la completación.

Los componentes básicos y la configuración de un sistema de bombeo por cavidades progresivas, son relativamente sencillos. El Equipo de Subsuelo, prácticamente cuelga

desde el cabezal del pozo. El rotor está unido a la sarta de cabillas la cual se conecta a la superficie del cabezal giratorio, posicionando en el tope de la “T” de flujo. El equipo de superficie transmite la energía de un motor a la sarta de cabillas. Los componentes del sistema incluyen (Fig. N°1.6.)

1.2.4 Equipo de superficie.

1. Cabezal: Se instala directamente sobre las conexiones de superficie y sus funciones son:

b.- Transmitir el movimiento de rotación desde el sistema motor a la sarta de cabillas.

c.- Llevar la carga axial a las cabillas.

d.- Sellar el sistema motor a los fluidos del pozo.

e.- Soportar el sistema motor

2. Sistema Motor: Acciona el cabezal giratorio a través de un conjunto de poleas y cadenas. Acepta todo tipo de equipos compatibles en la industria petrolera tales como:

a) Motores eléctricos.

b) Motores de Combustión interna.

c) Motores a gas.

3. Barra Pulida: Es un tubo sólido que se conecta a la sarta de cabillas y es soportada en la parte superior del cabezal giratorio mediante la instalación de una grapa. Su diámetro varía entre $\frac{1}{8}$ ”, $1\frac{1}{4}$ ”, y $\frac{1}{2}$ ”, con longitudes entre 16’ y 22’.

4. Prensa Estopa: Sella espacio entre la barra pulida y la tubería de producción, evitando la filtración y contaminación del área donde está ubicado el pozo.

1.2.5 Equipo de Subsuelo:

El equipo de subsuelo consta entre otras cosas de:

a) La Sarta de Cabillas: Es de tipo convencional, sin embargo, se debe tener cuidado a la hora de diseñar la bomba, por conectarse a través de un acople, con el sistema y hay que tener idea de la carga axial que va a soportar la sarta.

- b)** Tubería: La tubería debe ser diseñada de tal manera que la conexión de la primera junta de la tubería arriba del estator, tenga suficiente diámetro disponible APRA este movimiento excéntrico ocurra sin obstrucción alguna.
- c)** Rotor: Está diseñado de acero endurecido, que se cromó para hacerlo resistente a la abrasión, este depende y rota acoplado a la sarta de cabilla.
- d)** Estator: También esta hecho de acero endurecido, pero recubierto de un elastómero premoldeado internamente, este suspende a la tubería de producción.
- e)** Centralizador (opcional): Puede ser un componente adicional, sin embargo, tiene mayor uso especial para proteger las partes del sistema. El tipo de centralizadores empleado es el “no-soldado”, empleado en la tubería, con el propósito de minimizar el efecto de vibraciones y a la vez para centralizar la bomba dentro del revestidor.
- f)** Buje: Es enroscado en la punta del estator con el propósito de ayudar en el posicionamiento del rotor durante la instalación de la bomba.
- g)** Ancla o separador de gas: Lo principal de este separador es que tenga un separador de gas eficiente. La mejor técnica para separar el gas consiste en situar la bomba lo más alejado posible de la formación productora de gas.

h) Ancla o tubería: El ancla de tubería solo se utiliza para evitar el que durante las operaciones, la tubería se desenrosque, otro caso es en pozos muy profundos, donde la operación de pesca es muy costosa.

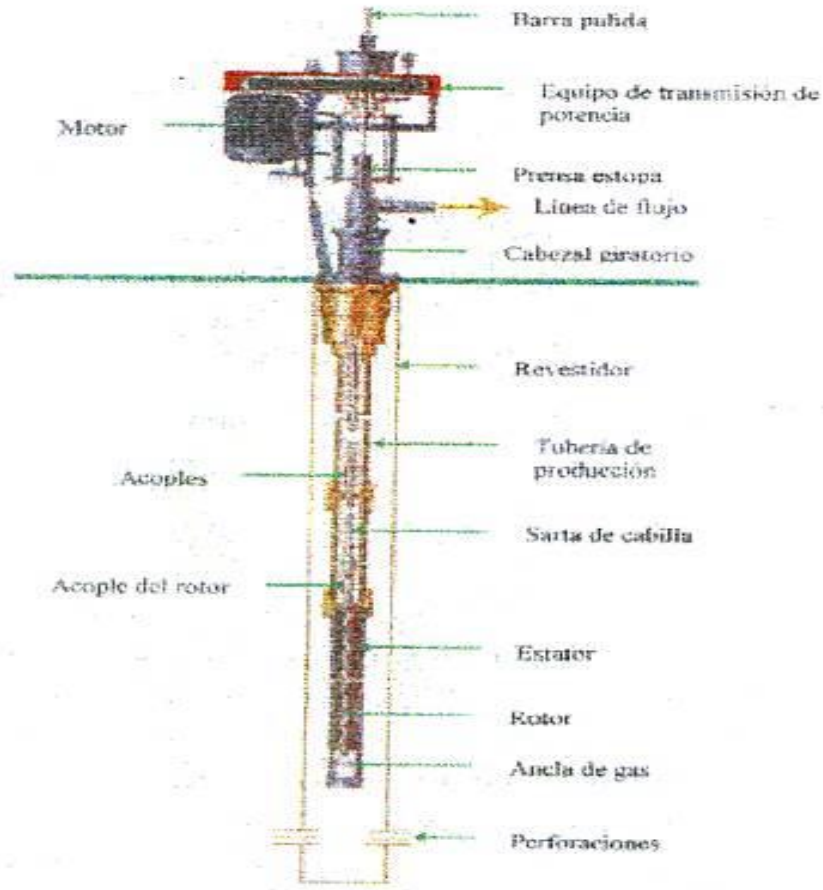


Figura 1.6 **Componentes de un sistema típico de Bombeo por Cavidades Progresivas**

1.2.6 Ventajas:

1. Es un método más económico que el Bombeo Mecánico.
2. Es versátil por el manejo de crudos livianos o pesados cuando la relación gas líquido es de valor mediano o bajo.
3. Es eficaz en manejar líquidos que arrastran arena y otros sólidos.
4. Está conformado por un sistema sencillo.

5. Maneja tasas hasta de 10.000 B/D.

1.2.7 Limitaciones:

1. No funciona aceptablemente a profundidades mayores que 10.000’.
2. El problema operacional más frecuente es daño al elastómero (o goma del estator); siendo esto por arrastre de sólidos, condiciones térmicas, condiciones químicas u otra razón.
3. En el caso de pozos desviados u horizontales se experimenta daño prematuro de las cabillas.

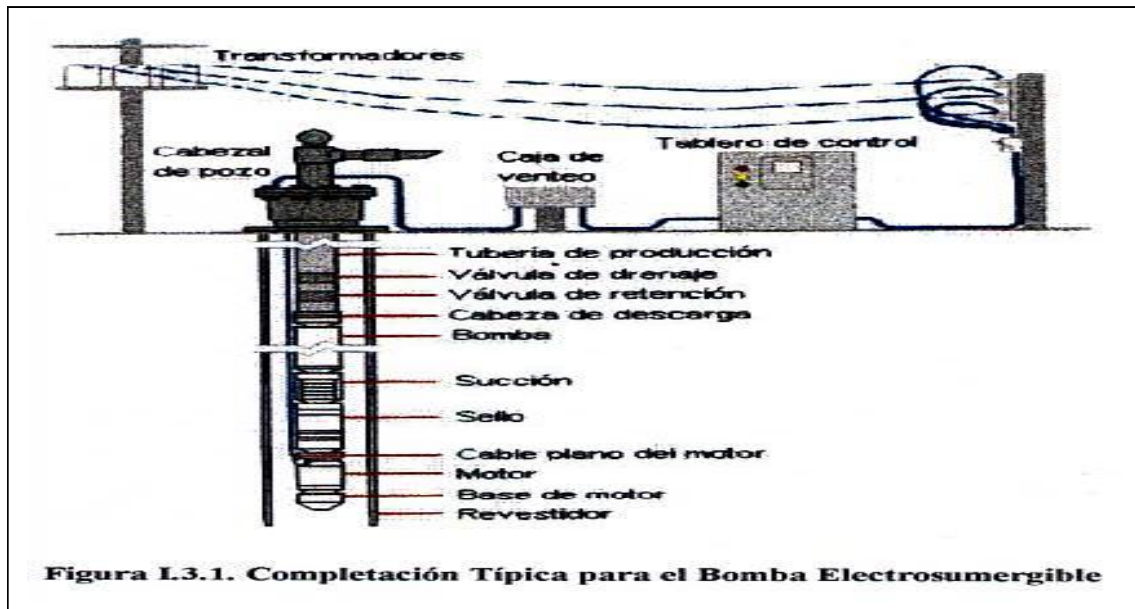
1.3 BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE

La primera bomba sumergible fue instalada en un pozo de petróleo en 1982 y desde entonces el concepto se ha probado por sí mismo, en todo el mundo petrolero. Actualmente, es considerado como efectivo y económico medio de levantamiento para altos volúmenes de fluido, desde grandes profundidades y bajo una amplia variedad de condiciones. El bombeo electrosumergible se puede usar para tasas que oscilan entre 200 y los 60000 BFP/D desde profundidades de hasta 15.000 pies.

Una instalación de bombeo electrosumergible típica, como puede verse en la figura N° I.7, consta de un motor eléctrico, una sección sellada, una sección de entrada, una bomba centrífuga multietapa, cable eléctrico, un tablero de control en superficie, una caja de conexión(entre el pozo y el tablero) y un banco de transformadores.

En condiciones de operación, el equipo debe estar en el fondo del hoyo, suspendido de la tubería de producción y sumergido en el fluido del pozo. La presión del pozo, a la profundidad de asentamiento del equipo, no genera problemas debido a que la sección

sellada iguala la presión interna del motor con la presión interna con la presión del hoyo.



El motor es eléctrico y gira a una velocidad relativamente constante, 3475 a 3560 RPM para una frecuencia de 60 Hz y de 2900 a 2915 RPM para 50 Hz. El mismo está acoplado directamente a la bomba por medio de un protector o sección sellada entre ambos. La energía es transmitida desde superficie, a través de un cable trifásico el cual se fija a la tubería de producción durante la completación del pozo.

Aunque este método no es el más empleado en el área de Cerro Negro, es usado ocasionalmente.

Este método de levantamiento artificial es aplicable cuando se desea producir grandes volúmenes de fluidos, en pozos profundos y con grandes potenciales. Sin embargo, los consumos de potencia por barril diario son también elevados, especialmente en crudos viscosos. Una instalación de este tipo, puede operar dentro de una amplia gama de condiciones y manejar cualquier fluido o crudo, con los accesorios apropiados para cada caso. El principal básico del sistema de bombeo es transmitir en forma de presión, la energía de un motor eléctrico sumergido en el fluido del pozo.

Es posible la aplicación del Bombeo Electrosumergible en pozos que se encuentren bajo las condiciones siguientes: Altas tasas de producción, altos índices de productividad, baja

presión de fondo, alta relación agua-petróleo (factor que es considerado de abandono para otros métodos) y baja relación gas líquido.

El equipo de superficie consiste de un banco de tres transformadores monofásicos, un transformador trifásico o un autotransformador, un controlador para el motor (donde usualmente existe un variador de frecuencias), una caja de conexión y un cabezal para bombeo electrosumergible, que permita el paso del cable y lo sella. El cable puede ser plano o redondo.

La eficiencia de la bomba depende de la cantidad de gas libre que se mueve junto con el líquido, pero en general, si la cantidad de gas libre es mínima o nula, la bomba alcanza eficiencias bastantes elevadas.

El equipo de bombeo es una pieza de presión y bajo condiciones normales de operación, su vida útil entre 1 y 3 años, aunque algunos equipos han entregado más de 10 años de buen servicio.

El bombeo electrosumergible representa un método de levantamiento artificial día a día más popular en pozos donde se espera altos volúmenes de fluido. Los adelantos tecnológicos han introducido mejoras continuas y hoy se cuenta con bombas electrosumergibles recuperables y suspendidas por cable, que se introducen en el pozo únicamente para arrancarlo, produciéndolo luego por flujo natural.

1.3.1 Equipos de Superficie.

Para la instalación del método de Bombeo Electrosumergible en un pozo, es necesario contar con los siguientes equipos de superficie:

1. Banco de transformación eléctrica: Está constituido por los transformadores, empleados para cambiar el voltaje requerido por el motor correspondiente.

2. Tablero de control: Es el comando de la instalación, su función es la proteger y controlar las operaciones del pozo.

3. Variador de frecuencia: Posee dispositivos capaces de suministrar frecuencias y voltajes variables al motor, permite arrancar los motores a bajas velocidades reduciendo los esfuerzos en el eje de la bomba y protege el equipo de variaciones eléctricas.

4. Caja de Venteo: Es una caja de conexiones que conecta el cable de energía del equipo de superficie con el cable de conexión del motor, además permite ventear a la atmósfera el gas que fluye a través del cable, impidiendo que llegue al panel, evitando una explosión. Está ubicada entre el cabezal de pozo y el panel de control.

5. Tablero de Control: Es el comando de la instalación, su función es la proteger y controlar las operaciones del pozo.

1.3.2 Equipos de Subsuelo.

Los principales componentes del equipo de subsuelo son:

1. **Motor Eléctrico:** Es la fuente de potencia que genera el movimiento a la bomba para mantener la producción de fluidos. El motor en estas instalaciones se presenta con una velocidad constante de 3500 RPM para una frecuencia de 60 Hz. Y 2915 RPM para 50 Hz. Se encuentra encerrado en una camisa llena de aceite refinado, con propiedades dieléctricas, el cual sirve para lubricar y disipar por conducción el calor generado en el motor a través de la carcasa de este. Es recomendable colocar el motor por encima de las perforaciones y que la velocidad mínima en el anular motor-revestidor sea aproximadamente de 1 pie-seg. El diámetro del revestidor limita el tamaño del motor.

2. **Protector o sello:** Se encuentra entre el motor y la bomba, permite conectar el eje de la bomba al eje del motor, ocasionándole daños. Además el protector compensa la expansión o contracción del motor y no permite la entrada del fluido al motor.

3. **Sección de admisión o succión:** La válvula de retención se coloca a dos o tres tubos de la bomba, disminuye la presión hidrostática sobre los componentes de la misma; la válvula de drenaje, es colocada a un tubo por encima de la válvula de retención, y se utiliza como factor de seguridad para circular el pozo revestidor a tubería de producción o viceversa.

4. **Separador de gas:** Está ubicado entre el protector y la bomba, reduce la cantidad de gas libre o que pasa a través de la bomba. El gas es siempre es venteado al espacio anular y producido por la línea de flujo, por lo cual debe evitarse el uso de empaaduras en el pozo para este tipo de levantamiento. Su uso es opcional, es decir, es decir cuando se prevé alta RGP.

5. **Bomba Electrosumergible:** Es del tipo centrífugas multietapas, cada etapa consiste de un impulsor rotativo y un difusor fijo. El número de etapas determina la capacidad de levantamiento y la potencia, requerida para ello. El movimiento rotativo del impulsor imparte un movimiento tangencial al flujo que pasa a través de la bomba, creando fuerza centrífuga que impulsa al fluido en forma radial, es decir, el fluido viaja a través del impulsor en la resultante del movimiento radial y tangencial, generando la verdadera dirección y sentido del movimiento.

6. **Cables trifásicos:** Suministran la potencia al motor eléctrico, y deben cumplir con los requerimientos de energía del mismo. Vienen aislados externamente con un protector de bronce o de aluminio, en la parte media, un aislante y cada cable internamente aislado con plástico de alta densidad. El conductor puede ser de aluminio o de cobre. La vida útil de un cable es de 10 años aproximadamente a una temperatura de 167°F: dicho cable es construido en una configuración plana o redonda, y cada conductor puede ser sólido o de múltiples cables, la configuración plana se usa cuando hay limitaciones de espacio físico.

1.3.2.1 Clasificación de las bombas:

Las bombas son clasificadas de varias formas: De acuerdo a sus aplicaciones, de acuerdo a los materiales con que se construyen, los líquidos que ellas manejan, su orientación en el espacio, o el tipo de mecanismo que las impulsa. Todas estas clasificaciones están limitadas a un propósito, y muchas veces, coinciden unas con otras. Todas estas clasificaciones están limitadas a un propósito, y muchas veces, coinciden unas con otras. Otras formas de clasificarlas se basan en el principio de transferencia de la energía al fluido. De acuerdo a este sistema las bombas se clasifican en dos grupos básicos: Bombas dinámicas y bombas de desplazamiento. Cada uno de estos grupos puede además ser desglosado en varios subgrupos, dependiendo de las características de diseño.

En las bombas dinámicas, la energía es transmitida continuamente al fluido y es utilizada para incrementar su velocidad. La diferencia de velocidad es subsecuentemente convertida en diferencia de presión. La Bomba Centrífuga, consiste básicamente en la parte móvil, denominada impulsor (impeller), montada en un eje rotativo y una parte fija o inmóvil denominada difusor, la cual es una serie de canales donde gradualmente se incrementa el área seccional. Las paletas del impulsor deben moldarse de una forma apropiada, para que su rotación genere desplazamiento de las partículas de fluido desde la entrada hacia la zona de descarga. De esta manera dichas partículas son aceleradas, lo cual se traduce en un aumento de su energía cinética. Esta energía es parcialmente convertida en energía potencial (presión) en el impulsor y el difusor. Básicamente el conjunto impulsor-difusor constituye una etapa de la bomba y se muestra su esquema en la figura N°1.3.2

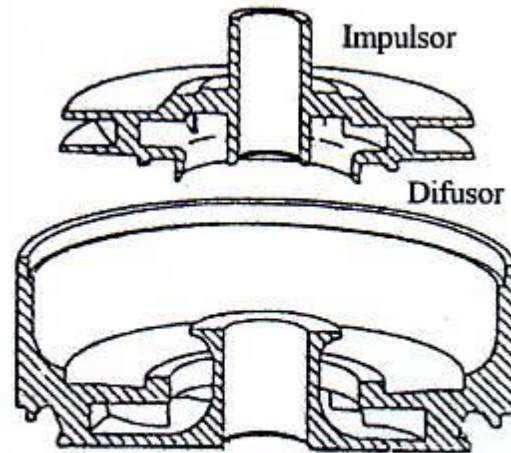


Figura I.3.2. Esquema de una Etapa

En las bombas de desplazamiento, la energía es periódicamente transmitida aplicando una fuerza a una o más partes móviles, entre las cuales se encuentra confinado un volumen de fluido. Bajo la acción de esta fuerza, la presión de este fluido aumenta hasta forzarlo a través de las válvulas de descarga.

Las bombas electrosumergibles, usadas actualmente en la producción de crudo, pertenecen a la categoría de bombas dinámicas o centrífugas, de impulsor cerrado, multietapas, con succión individual y de flujo radial.

1.3.2. 2 Eficiencia de la bomba:

Las bombas que ocurren en una bomba pueden ser descritas en términos de eficiencias hidráulicas, volumétrica y mecánica. El producto de estas tres componentes es llamado comportamiento ante fluidos de diferentes gravedades específicas, viscosidades y variaciones en el equipo:

1. Efecto de un cambio de velocidad: La tasa de flujo, en una bomba, es directamente proporcional a la rapidez de giro. De forma similar la altura dinámica de fluido que la bomba puede alcanzar, es proporcional al cuadrado de su velocidad, y la energía suministrada al equipo por unidad de tiempo es proporcional al cubo de ese mismo parámetro. Aunque estas reglas son válidas cuando se desprecian las pérdidas por fricción y turbulencia, son útiles para muchos de los propósitos prácticos, por ser una pequeña fracción de las pérdidas totales. La eficiencia de la bomba, es independiente de la velocidad.

2. Efecto de la gravedad específica: La altura dinámica producida por un impulsor no depende de la gravedad específica ni tampoco de la eficiencia de la bomba, pero la energía que debe suministrarse al equipo varía directamente con ella.

3. Efecto de un cambio en el diámetro del impulsor: Aunque la eficiencia de la bomba no cambia cuando varía el impulsor, su capacidad de elevar un líquido depende del cuadrado del diámetro. También la energía que debe suministrarse por unidad de tiempo es proporcional al cubo del diámetro.

4. Efecto de la viscosidad: El efecto de la viscosidad en el comportamiento de una bomba centrífuga, no se conoce con exactitud, pero se sabe que fluidos viscosos tienen una alta resistencia para fluir. Consecuentemente, las pérdidas por fricción y la fricción en los discos se incrementa, lo cual resulta en un aumento de la energía requerida por el equipo y en una disminución de la capacidad de elevación. La viscosidad reduce la eficiencia de la bomba.

1.3.3. Ventajas:

Entre las principales ventajas que presenta el Bombeo Electrosumergible se encuentran:

1. Puede levantar altos caudales en pozos no tan profundos con revestidor grandes.
2. Los costos de levantamiento para grandes volúmenes son bajos.
3. Se puede instalar fácilmente sensores de presión en el hoyo para ser medidos en la superficie.
4. Se adapta a pozos desviados.
5. Estas instalaciones no representan peligro en localizaciones urbanas.

1.3.4 limitaciones:

Entre las limitaciones para la aplicación del Bombeo Electrosumergible se encuentran:

1. Es imprescindible una fuente de corriente eléctrica.
2. Se requiere de altos voltajes.
3. Limitaciones por el tamaño del revestidor.
4. Los cables causan problemas en el manejo de las tuberías.
5. Los cables se deterioran al estar expuestos a altas temperaturas.
6. La producción de sólidos.
7. No es funcional a altas profundidades debido al costo del cable, a posibles problemas operacionales, y a los requerimientos de alta potencia en superficie.
8. La presencia de gas libre en la bomba, disminuye la capacidad de levantamiento.

1.4. BOMBEO HIDRÁULICO

Este el sistema más costoso para levantamiento artificial desde el punto de vista de gastos operacionales.

Se puede aplicar en dos modalidades: Bombeo hidráulico tipo pistón y bombeo hidráulico tipo Jet. A continuación se hace una descripción breve de estos dos tipos de modalidades:

Bombeo Hidráulico tipo pistón.

El funcionamiento de este sistema se basa en el uso de bombas reciprocantes cuyo principio de acción, es similar al de las bombas en el bombeo mecánico. Las bombas hidráulicas emplean un pistón accionado por el fluido inyectado a alta presión, una cabilla y dos o más válvulas de retención. El fluido de potencia a alta presión acciona la sección motriz en el fondo del pozo en forma recíprocante al exponer alternadamente diferentes áreas de un pistón impulsor al fluido presurizado. El movimiento recíprocante del pistón impulsor se transfiere a través de un acoplamiento mecánico a una bomba de pistón.

Ventajas:

- La velocidad y el tamaño de la bomba pueden ser cambiadas fácilmente manteniendo las condiciones del pozo.
- Los crudos pesados y altamente viscosos son manejables al mezclarse con crudos más livianos como fluidos de potencia.
- Es posible subir la bomba hasta la superficie, sin remover la tubería de producción.
- Una estación central en superficie es capaz de manejar varios pozos. Las instalaciones en pozos múltiples pueden accionarse desde una misma fuente de fluido motriz.
- La instalación ofrece una unidad compacta para pozos aislados.
- El bombeo hidráulico es más flexible para adaptarse a los cambios en caudales de producción
- Las bombas hidráulicas son utilizadas en pozos direccionales.
- Una bomba hidráulica con pistón tiene mayor eficiencia a grandes profundidades que una bomba que emplee cabillas, ya que no produce estiramiento de las mismas.

Limitaciones

- Alta inversión inicial. Se requieren equipos de alta presión, líneas para los fluidos de potencia, bomba triples, filtros para el tratamiento de fluidos de potencia y cabezales en los pozos. Además la tubería debe ser del diámetro suficientemente grande y resistente a altas presiones.

- El mantenimiento de los equipos a altas presiones en superficie es altamente costoso. Además altas presiones en superficie representan un riesgo para la seguridad de zonas pobladas cercanas.
- Altas relaciones de gas libre a la entrada de la bomba afectan su eficiencia.
- Altas temperaturas pueden causar fallas en las empacaduras.
- Se requiere de un equipo de tratamiento para acondicionar el fluido motriz.
- En Venezuela no se cuenta con personal altamente capacitado en conocimiento y pericia, para operar y realizar mantenimientos en estos equipos.
- Adicionalmente, no existe ninguna compañía suplidora que garantice el servicio técnico eficiente.
- Existe el riesgo de producirse incendios por posibles escapes de gas en la bomba, lo cual pudiese afectar toda la instalación incluyendo los tanques de fluido de potencia y de almacenamiento.

Breve referencia del Bombeo Hidráulico Tipo Jet.

Este Método es similar al bombeo hidráulico tipo Pistón en cuanto a su principio de funcionamiento basado en la inyección de un fluido presurizado (fluido de alta potencia o fluido motriz). En cuanto a las instalaciones y equipos de superficie para ambos métodos de levantamiento son iguales, la diferencia principal es la bomba de subsuelo.

En la industria petrolera, el bombeo hidráulico tipo Jet se conoce desde el año 1970. A pesar de ser uno de los sistemas más prácticos por su sencillo diseño, por la ausencia de partes móviles y por sus pequeñas dimensiones, es poco aplicado en Venezuela, por la escasez de especialistas en el área, y por los altos costos que implican la instalación de un sistema de este tipo.

1.5 ALGUNOS DE LOS FACTORES QUE AFECTAN LA ESCOGENCIA DE LOS SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL EN EL ÁREA DE CERRO NEGRO

Para el presente trabajo se debe tener en cuenta aquella expresión conocida en el ámbito petrolero de que “el yacimiento más homogéneo es heterogéneo”. Ella presenta en síntesis la diversidad de condiciones que presentan cada yacimiento, y en particular las particularidades ofrecidas por los pozos pertenecientes al campo Cerro Negro, cuyas características son realmente desventajosas.

Es en este contexto donde resalta el trabajo realizado por el profesor Víctor Escalona titulado “Análisis de los factores que afectan la escogencia de los sistemas de levantamiento artificial en el área de Cerro Negro, Morichal, Estado Monagas, Venezuela”, donde utilizando un análisis cualitativo fundamentado en los trabajos de Clegg, Bucaram y Hein Jr. Se compararon tres métodos de levantamiento utilizados en ésta área tomando en consideración 14 criterios técnicos / económicos.

Realizando el estudio del comportamiento de cada uno de los sistemas de levantamiento artificial (Bombeo Mecánico, Bomba de Cavidad Progresiva y Bombeo Electrosumergible) desde un punto de vista técnico / económico, a través de factores de evaluación de la producción en el Campo Cerro Negro. En el trabajo realizado por Gustavo Giusti, se hizo un análisis de los siguientes factores:

COSTO DE CAPITAL: En Bombeo Mecánico es definitivamente significativo este criterio, debido a que es el sistema que tiene un costo apreciablemente bajo, con referencia a otros sistemas de levantamiento Artificial. Su aumento es proporcional a la profundidad, por causa de que se requieren unidades mas largas, lo que por ende incrementa el costo. En cuanto a Bombeo de Cavidades Progresiva el costo también es relativamente bajo y de manera similar aumenta con la profundidad y naturalmente muy ligado a factores de gran influencia en este tipo de sistemas, como lo es la tasa y las características de la arena,

siendo su instalación consideradamente apropiada cuando hay condiciones normales conocidas la viscosidad de crudos pesados y extrapesados, propios de esta localización geográfica. En cuanto a Bombeo Electrosumergible, en el área de Cerro Negro se tienen condiciones adversas por las arenas lenticulares poco consolidadas, por lo que este tipo de sistemas son moderados y en muchos casos altos, en comparación con los otros sistemas y condicionado por un factor muy importante como lo es el suministro eléctrico, como consecuencia del requerimiento de suministro eléctrico para aumentar la potencia de la bomba, lo que suma gastos adicionales por las características de los crudos.

EQUIPO DE FONDO: En el caso de Bombeo Mecánico, reviste particular importancia el equipo de fondo, siendo necesaria una buena selección de cabillas y bombas, ya que el esfuerzo a realizar por las características ligadas a los crudos en condiciones normales, es mucho mayor. Esto trae como consecuencia aumentar la potencia de la bomba, y el redimensionamiento del sistema de cabillas para hacerlas operativas de acuerdo al esfuerzo derivado de la alta viscosidad de los fluidos a manejar. En cuanto a Cavidades Progresivas, requiere de un acertado diseño y selección del elastómero, que sea ideal para las prácticas de operación, es menos complicada en este aspecto en comparación con el bombeo Mecánico. En cuanto a Bombeo Electrosumergible, también debe adaptar su equipo de subsuelo a las exigencias del crudo, tales como, cable, motor de caballaje y sellos apropiados resistentes al uso de diluentes requeridos para el mejor manejo de crudos característicos a condiciones normales, más aún, tratándose de este tipo de bombeo, por lo del manejo de altas tasas.

EFICIENCIA HIDRÁULICA: Bombeo Mecánico se considera bueno tomando en consideración este criterio en el manejo de crudos en esta área a condiciones normales, debido a que se alcanzan rendimientos de hasta 50%, aumentándose a niveles superiores que oscilan ente 50% y 60%, porque en la zona se inyecta diluyente, lo que hace de la eficiencia hidráulica aceptable. En cuanto a Bombeo de Cavidad Progresiva, la eficiencia para Cerro Negro se ubica en ordenes superiores a la del bombeo mecánico, ubicándose normalmente en un 55%, y con la correspondiente inyección de diluyente, alcanza niveles de hasta un 70% de eficiencia, lográndose alcances de cotas de excelencia.

En referencia a Eficiencia Hidráulica es calificada para esta zona de buena regular, alcanzándose un rendimiento que oscila entre 30% y 50% de eficiencia. No obstante, en condiciones normales la mayor eficiencia reportada en el Campo no llega a 40%.

COSTOS DE OPERACIÓN: Las profundidades de los pozos en el Campo no pasan de los 6000', lo que para Bombeo Mecánico resultan costos de operación bajos, debido a que están determinados por profundidades menores de 7500' y producción menor de 400 bls/D por pozo. Si aumentan para una realidad particular los volúmenes, implicaría hacer una mayor inversión. Similar situación presenta el Bombeo de Cavidades Progresivas, causado por el incremento de los costos por efecto de la corta vida útil del rotor-estator a condiciones normales, ya que en la zona se manejan niveles de producción de arena y en general la poca consolidación de las arenas. En Referencia al Bombeo Electrosumergible, los costos son variados en especial la necesidad de aumentar el caballaje de la bomba, lo que incrementa los costos de operación, por encima de los costos de operación de los otros sistemas.

LIMITES DEL TAMAÑO DEL REVESTIDOR: En el Bombeo Mecánico, solamente se presentan problemas para pozos con altas tasas, lo cual para el área en condiciones normales no se cumple, ya que en general en el yacimiento Morichal las tasas son relativamente bajas. Igual situación presenta en Sistema de Cavidades Progresivas, ya que los revestidores oscilan entre 4'' y 5,5'' y solo se pueden presentar problemas en los separadores de gas debido a altas RGP o RGB, lo cual no es un fenómeno frecuente en Cerro Negro. Por su parte en BES, el tamaño del revestidor sería limitado, ya que el mismo por las características de los crudos presentes en el área, requerirá instalación de motores más grandes que los habituales, ya que el sistema fue concebido para manejar altos volúmenes de fluidos de baja viscosidad.

NIVEL DE RUIDO: El Bombeo Mecánico genera ruido moderado aceptable para Cerro Negro por no ser zona urbana, pero, genera contaminación. La Bomba de Cavidad Progresiva es menos ruidosa que el Bombeo Mecánico.

La Bomba Electrosomergible es menos ruidosa que los dos sistemas anteriormente nombrado, por lo que cuando se usa se le califica de excelente, siendo este criterio obviado en esta discusión con referencia a este sistema, como consecuencia de que la localización es no urbana. En todo caso el ruido es un contaminante sónico que debe ser minimizado usando equipos que lo reduzcan.

DIAGNÓSTICO: Para el Bombeo Mecánico se tiene consideración excelente ya que este sistema de levantamiento artificial, puede ser fácilmente analizado mediante prueba de pozos, niveles de fluidos y otros, aquí no es posible el uso de dinamómetros y cartas de bombeo, basándose en el Análisis de Presiones por niveles. En bombeo electrosomergible tiene calificación de moderado, en este sistema se realizan chequeos eléctricos, pero se necesitan equipos especiales y se apoyan en sensores de presión y temperatura.

HOYOS DESVIADOS: el Bombeo Mecánico en este criterio es regular. Se considera que se ha alcanzado inclinaciones de 15° por cada 100', y se usan guías o centralizadores para evitar roce de cabillas. El Bombeo de Cavidades Progresivas en Cerro Negro hay pozos inclinados con este sistema, se han realizado algunas perforaciones son pocas en Cerro Negro.

En cuanto al Bombeo Electrosomergible, se considera como buena, pero se conocen en el campo muy pocas o muy limitadas. Existen escasos pozos (4) en condiciones normales con este sistema. Poca experiencia, muy pocas para concluir.

Capacidad par manejo de sólidos / arena: En Bombeo Mecánico este criterio es regular para viscosidades menores de 10 cps. Mejor desempeño a altas viscosidades maneja arena con bombas especiales en muy pequeños porcentajes.

En cuanto a Bombeo de Cavidades Progresivas es mejor que el Bombeo Mecánico. Su manejo excelente se llega a manejar hasta más de 50% de arena viscosa mayores de 200 cps., en condiciones normales resulta ideal este bombeo, como hay escasa producción de

agua sería ideal desde este punto de vista. No se recomienda para este criterio en particular, debido al efecto de desgaste que ocasiona en los elastómeros la arena.

LIMITACIONES DE TEMPERATURA: En Bombeo Mecánico, es calificada de excelente; usado normalmente para manejar temperaturas a la altura de los 550° F muy por encima de las manejadas en condiciones normales; desde este punto de vista las condiciones son excelentes. En Bombeo de Cavidades Progresivas, también son buenas para nuestra zona en consideración ya que maneja corrientemente con temperatura de 250° F superiores a las de condiciones normales. En cuanto a BES buenas condiciones para su funcionamiento en cuanto a la temperatura de la zona, pues este sistema de levantamiento se maneja en rangos necesarios en Cerro Negro desde este punto de vista. Independientemente, cualquiera de los tres métodos operan bien bajo este parámetro, ya que en Cerro Negro la temperatura oscila entre 130° y 150° F.

CAPACIDAD EN MANEJO DE FLUIDO VISCOSO: En bombeo Mecánico la experiencia es calificada de buena en crudos de viscosidades menores de 200 cps, y tasas menores de 400 Bls/ D. Presenta problemas con cabillas para altas tasas. Este fenómeno no se da en condiciones normales donde la producción es moderada. Se requiere diluyente para bajar la viscosidad. Presenta problemas de flotabilidad, exceso de esfuerzo y fricción.

En Bombeo de Cavidades Progresivas la experiencia es calificada de excelente, también con requerimiento de diluyente, actualmente este sistema es aceptado en condiciones normales por las buenas experiencias tenidas en el campo.

Al principio presentaba rotura de cabillas, usando igual sarta para el Bombeo Mecánico, actualmente modificándose y superándose el problema. El Bombeo Electrosumergible es pobre, manejando fluidos viscosos como los que se manejan en condiciones normales. En Morichal hay escasas instalaciones, hay que usar diluyente para hacer más liviana la columna, al igual que los sistemas anteriores, pero, en este sistema la necesidad es relativamente mayor, ya que está hecho para manejar altas.

CAPACIDAD PARA LEVANTAR ALTOS VOLÚMENES: En Bombeo Mecánico es moderada la capacidad para levantar fluidos. Se restringe a bajas profundidades utilizando varillas largas, máximas tasas de 4000 BLS/D. Esta realidad no corresponde a condiciones normales, donde las tasas son moderadas con producción por pozo, alrededor de los 800 bls/D. En BCP la capacidad de levantar altos volúmenes es pobre, más aún en caso que nos ocupa, donde la producción por pozo es relativamente moderada. En Bombeo Electrosumergible es excelente, limitada solo por HP o potencia de la bomba, más aún en condiciones normales donde las características del fluido viscoso disminuye esa propiedad de alcanzar con facilidad altas tasas como es usual o normal en este tipo de bombeo.

CAPACIDAD DE LEVANTAR BAJOS VOLÚMENES: El Bombeo Mecánico puede ser excelente, pero no se logra con exactitud por las características del bitumen por la alta viscosidad del crudo. En Bombeo de Cavidades Progresivas es excelente para pozos llanos, donde la capacidad es de 100 barriles por DIA. En caso de condiciones normales es ejemplo a considerar en la realidad planteada. Por último para bombear con Bombeo Electrosumergible bajos volúmenes, esto no es aconsejable, ya que es una realidad fácil de palpar en condiciones normales de Morichal para levantar, por razones de su propia naturaleza y por razones de alta inversión o costos.

1.6 METODOLOGÍAS PARA LA SELECCIÓN DE SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL.⁽¹²⁾

Para la realización de este Trabajo Especial de Grado, se incluye y comenta todo lo relativo a las metodologías existentes usadas actualmente para su discusión y evaluación, como lo son la Metodología para la Selección de Sistemas de Levantamiento Artificial, y el Sistema Experto de Levantamiento Artificial desarrollado por INTEVEP, ambas Herramientas computacionales de reconocida vanguardia en cuanto a la selección de mecanismos de producción petrolera, en el área de los Sistemas de Levantamiento Artificial de Crudos.

1.6.1 MODELO 1- SEDLA – SISTEMA DE EXPERTO DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL

1.6.1.1 SISTEMAS DE EXPERTOS. GENERALIDADES

Son aquellos programas de computación donde se han plasmado una serie de conocimientos y procedimientos que razonan su manejo. Los *sistemas de expertos* se basan en técnicas de *inteligencia artificial**.

Todo sistema de experto está fundamentado en la aplicación de conocimiento acerca de un área específica., los cuales son almacenados en una base de datos. El sistema experto es capaz de manejar esa información para resolver problemas específicos del área.

La *base de conocimientos* empleada por el sistema experto proviene de comunicación verbal (entrevistas con personas expertas), libros, manuales, guías y otras publicaciones. El proceso de razonamiento de un sistema experto usualmente se basa en formas simples de lógica que permiten llegar a conclusiones en forma ordenada.

Los sistemas expertos están siendo utilizados exitosamente para incrementar la productividad y la pericia desde fines de los años 70, cuando emergieron de las Universidades y Centros de Investigación sobre la llamada *Inteligencia Artificial**. Estos sistemas fundamentales en conocimientos, constituyen una herramienta de ayuda, ya que entre sus funciones está agilizar tareas de diagnóstico, servir de apoyo a esquemas de inversiones, asistir la asignación de recursos en labores de planificación, etc.

INTELIGENCIA ARTIFICIAL: Disciplina Científica cuyo fin último es diseñar y construir sistemas capaces de evaluar la actividad humana en los diversos campos del saber, la Técnica y la Industria.

La finalidad de un sistema experto es llegar a reflejar el comportamiento o razonamiento de los expertos humanos en las distintas actividades profesionales del hombre. Los expertos se caracterizan por ser personas a quienes les corresponden tomar decisiones importantes en situaciones de alto riesgo, y poseen la capacidad de hacerlo, como resultado de su entrenamiento, experiencia y práctica profesional.

1.6.1.2 ESTRUCTURA BÁSICA DE LOS SISTEMAS EXPERTOS ⁽¹⁰⁾

Los tres elementos básicos son: *base de conocimientos*, *fuentes de inferencias* y la *interfaz* entre el sistema y el usuario. La base de conocimientos almacena los hechos que reflejan la experticia del sistema, la fuente de inferencia contiene la interpretación del comportamiento (razonamiento) y el control de la búsqueda de soluciones y respuestas, la interfaz provee al usuario el lenguaje a través del cual recibe dichas respuestas

El método de razonamiento más común empleado en los sistemas expertos es la aplicación de reglas de producción y es empleado en **SEDLA**.

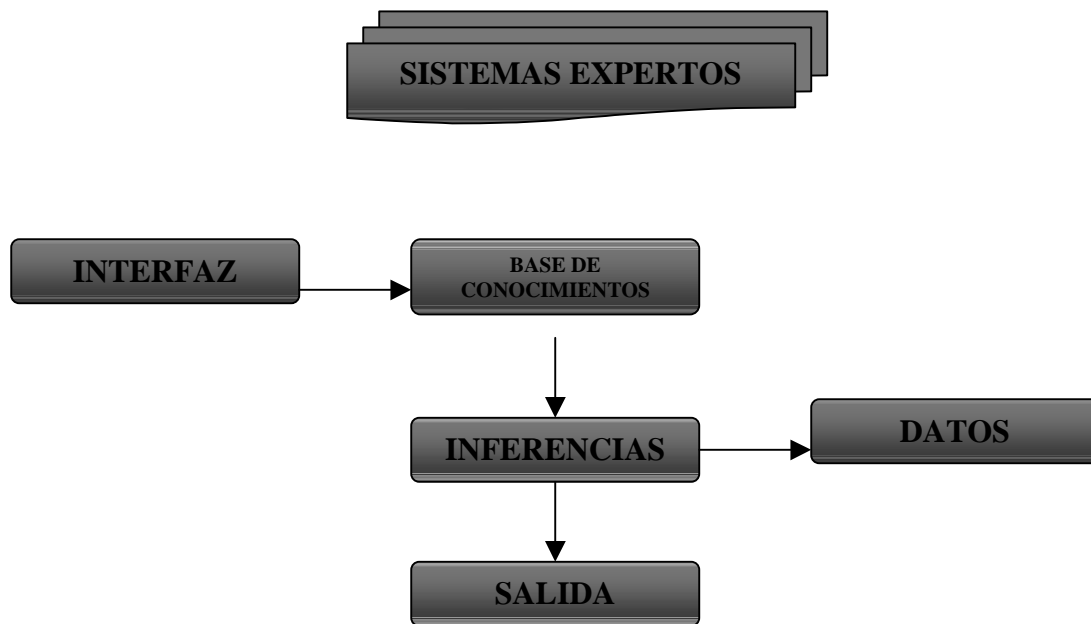
Haciendo la analogía de los sistemas de expertos con los programas convencionales de computación, se tiene que la base de conocimientos podría ser equivalente al código del programa, la fuente de inferencias y razonamientos se asemeja al proceso de compilación e interpretación, y para ambos existe la interfaz con el usuario. Sin embargo, la tecnología de sistemas expertos ofrece **VENTAJAS** que incluyen:

- La expansión de los horizontes de la programación: se expanden las aplicaciones de la programación en distintas áreas donde el problema es considerado de gran relevancia, requiere de sentencias con criterios e inferencias.
- Flexibilidad en el desarrollo del programa: el programa convencional requiere de largo tiempo, para diseñar la rígida estructura del código, un sistema de experto está siendo constantemente modificado. Así el problema puede ser definido más de una vez, incorporando nuevas experiencias adquiridas con el tiempo.

La figura 1.6.1 muestra la comparación entre los sistemas expertos y los programas convencionales.

FIGURA N° 1.6.1

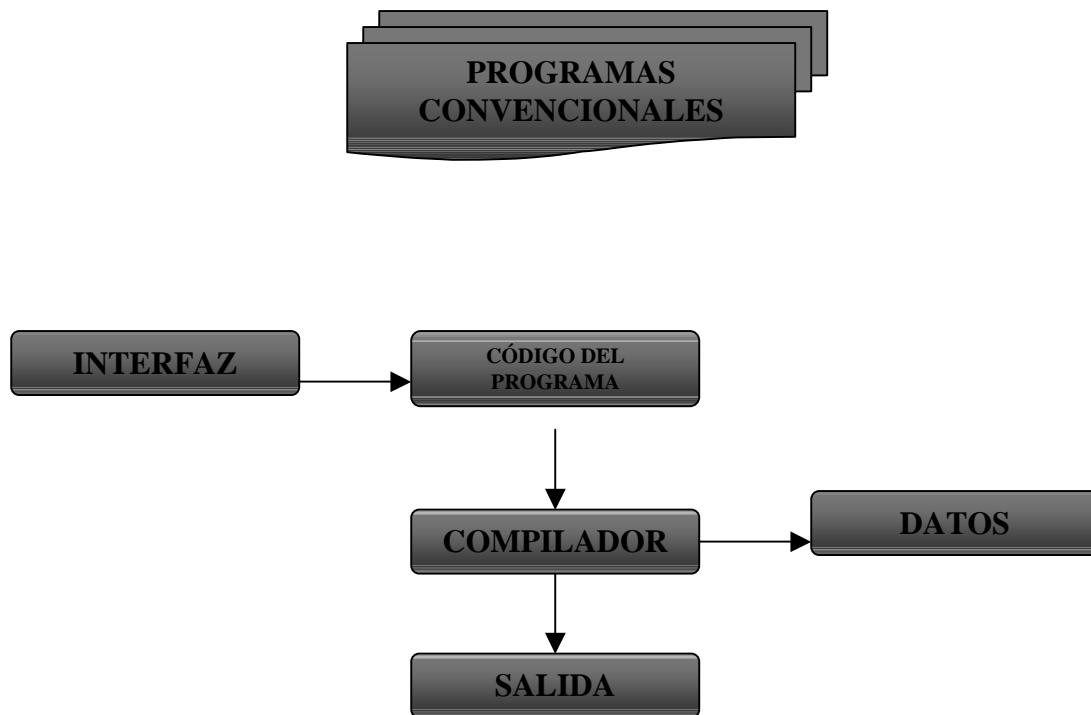
SISTEMAS DE EXPERTOS Y PROGRAMAS CONVENCIONALES



Fuente: Reyes, Yamila (1999)

ILUSTRACIÓN N°1.6.2

SISTEMAS DE EXPERTOS Y PROGRAMAS CONVENCIONALES (Continuación)



Fuente: Reyes, Yamila (1999)

1.6.1.3 APLICACIONES EN EL ÁREA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL

La selección del mejor método de levantamiento artificial para un pozo, representa una difícil labor frente a la amplia gama de tecnologías de levantamiento disponibles en la actualidad. A pesar de haberse escrito mucho acerca del diseño y las aplicaciones de los distintos métodos, generalmente los ingenieros están capacitados sólo en algunos de ellos. Además, las implicaciones de carácter económico, como la inversión inicial, costos de reparación y mantenimiento, y los problemas de producción (arena, H₂S, parafina, etc.), complican mucho más la selección, por todo lo anterior, la selección del método óptimo de levantamiento artificial en pozos petroleros, representa un área de aplicación potencial para el desarrollo de un sistema experto.

1.6.1.4 DESCRIPCION GENERAL DEL SISTEMA

El Sistema Experto De Levantamiento Artificial (**SEDLA**), almacena la experticia en una base de conocimiento, para seleccionar un grupo de doce (12) métodos de levantamiento artificial, el conjunto más comprometedor de ellos para el pozo en estudio.

La adquisición de conocimientos, se realizó mediante entrevistas y cuestionarios a diez expertos internacionales, quienes aportaron su pericia y conocimiento en los distintos métodos de levantamiento artificial, originando la base de datos de **SEDLA**. Los expertos entrevistados fueron: **Kermit Brown, Zeimir Schmidt, Harold Winkler, James Lea, Walter Zimmerman, John Svinos, Steven Klein, Lyle Wilson, Howand Tait y Ernest Beauregard.**

El sistema tiene como requerimientos de software “**Microsoft Windows**” versiones 3.1, 3.11, **WFN 3.11 ó 95** y de hardware un microprocesador Pentium de 133 Mh2 como mínimo, y 15 megabytes de memoria RAM (extendido). El sistema **SEDLA v 2.1 .a**, está

desarrollado empleando las siguientes plataformas o herramientas “Smarts Elements v.2.6” para las reglas de preselección, y “Power Builder v.5.04” como interfaz.

Las empresas internacionales que actualmente poseen o están negociando la licencia del sistema son: *Baker Jandine (Inglaterra)*, *Ecopetrol (Colombia)*, *Cenpes (Brasil)* y *Pemex (México)*.

BASE DE CONOCIMIENTOS

La base de conocimientos del **SEDLA** está integrada por:

- **Los objetos:** son los elementos que definen la base de conocimiento en si, estos elementos son: los parámetros, las reglas y las pantallas.
- **El método de inferencia:** es la lógica que define como se resuelve el problema de la base de conocimientos.

Los parámetros son verdades en el dominio de la base de conocimientos. Cada parámetro posee un nombre que lo identifica, y pertenece a un grupo determinado de datos. Pueden tener uno o más valores, y sus valores pueden especificarse con diferentes grados de certeza.

Las reglas de producción, son relaciones entre uno o más parámetros en una base de conocimiento. El sistema evalúa si la premisa de la regla es verdadera o falsa cuando verifica los valores de los parámetros. De ser cierta la premisa, el sistema ejecuta la acción especificada en la cláusula de acción de la regla. Se distinguen tres tipos de reglas de producción dentro del sistema, las cuales son:

- **Reglas de Inicialización:** su función es inicializar los valores provenientes de la base de datos correspondientes a todos los parámetros.

Ejemplo: (@META= M_CAP.eficienciaVolumétrica (@INITVAL=0.0))

• **Reglas de Conocimiento:** contienen la pericia relacionada al método en particular, con el fin de organizar el gran número de reglas que existen, con un formato para su identificación.

Ejemplo:

(@ RULE = ANU_GAPI_ 02)
 (LHS = (> = (P gravedad API) (10))
 (< (P gravedad API (30)))
 (@HYPO = (EnviarMensaje (“Interpolar”) (@To =
 M @ ARG1 = Y, @ ARG2 = P gravedad API, @ ARG3 = 10.0;
 @ARG4 = 1.0 , ~ ARG5 = 30.0, ~ ARG6 = 1.0))

• **Reglas de Cálculo:** activar las reglas monitoras generales, para sumar, formatear y promediar el puntaje total obtenido por el método de levantamiento artificial, que se está evaluando.

Ejemplo:

(Asignar ((M. Ef EXPE*M PS EXPE) + (M. Ef UBIC* M PS UBIC)
 + (M. cf COMP*M PS COMP) + (M. cf ADAP* M PS ADAP)
 + (M. cf VOGD*M PS VOGD)) (M: efFCUAL))

Las pantallas, corresponden a los medios de interacción o diálogo entre el sistema y el usuario, despliegan los campos de preguntas y respuestas.

El método de inferencia se encarga de resolver una consulta realizada al sistema basado en conocimientos. Durante una consulta, el sistema intenta encontrar valores para uno o varios parámetros realizando interferencias a partir de reglas y valores conocidos de otros parámetros.

El método de inferencia empleado por el sistema denominado encadenamiento hacia delante, en el cual se parte desde la data conocida y se llega a la conclusión. En la técnica de inferencia por encadenamiento hacia delante, el sistema recolecta los parámetros, con valores conocidos considerados en la lista de parámetros. También recolecta las reglas aplicables de la lista de reglas, y finalmente ejecuta las acciones para cada regla cuya premisa sea verdadera.

1.6.1.5 METODOS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL QUE COMPRENDE EL SISTEMA

El Sistema contempla doce (12) métodos de levantamiento artificial: Bombeo Mecánico Convencional (balancín), Bombeo de Cavidades Progresivas, Bombeo Electrosumergible, Bombeo Hidráulico Tipo Pistón, Bombeo Hidráulico Tipo Jet, LAG Continuo Anular, LAG Continuo Tubería, LAG Intermitente Convencional, LAG Intermitente con Cámara de

Acumulación, Pistón Metálico Convencional y LAG Flujo Pistón.

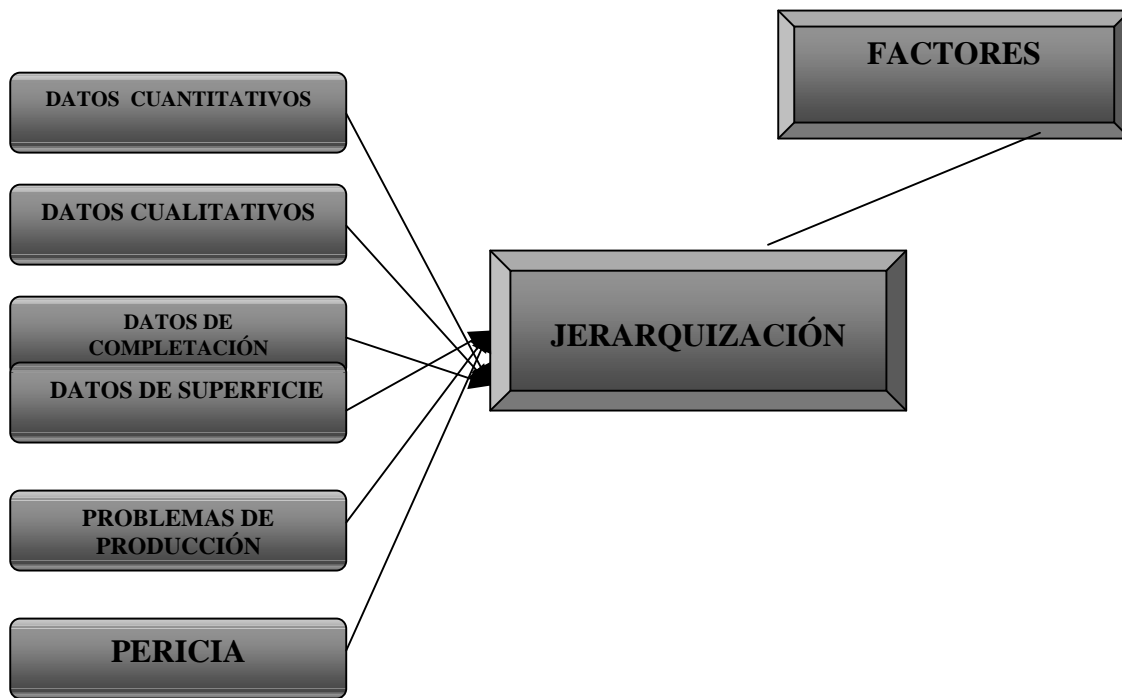
1.6.1.6 MODULOS DEL SISTEMA

SEDLA es un programa interactivo estructurado en tres módulos principales: preselección, diseño y evaluación económica, y un cuarto módulo de base de datos, los cuales por encontrarse interconectados entre sí, permiten el flujo de información a través de cada uno de ellos. La figura N° 2 ilustra esta estructura.

MÓDULO DE PRESELECCIÓN

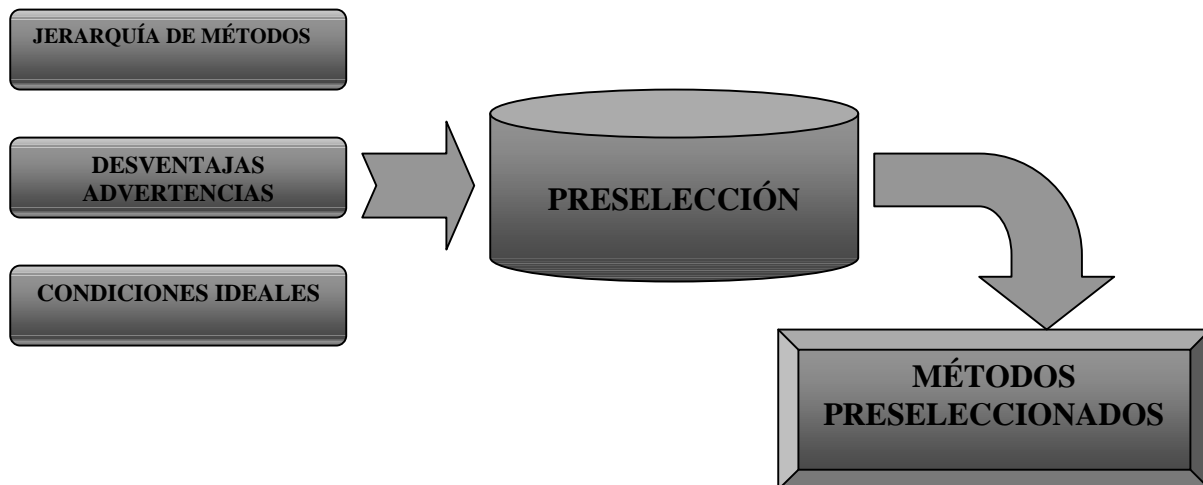
Es el módulo de evaluación técnica o módulo experto, incluye la base de conocimientos. Este módulo, permite jerarquizar de acuerdo a la factibilidad técnica, la aplicación de cada método de Levantamiento Artificial por separado, considerando un conjunto de factores de carácter cualitativo, cuantitativo y de problemas de producción. Cada uno de estos factores tiene asociado un peso, el cual es mayor o menor dependiendo del grado de importancia. Para cada método de Levantamiento Artificial en particular, los factores antes mencionados son evaluados de acuerdo con los datos suministrados del pozo en estudio. Con el resultado de esta evaluación y con el peso de cada parámetro se le asigna una puntuación a cada método; siendo 100% el máximo valor posible, al mismo tiempo se van registrando las desventajas y advertencias que podrían afectar el desempeño del método o en última instancia descartar su factibilidad técnica.

Una vez finalizada la evaluación de los métodos, el sistema muestra por pantalla la lista jerarquizada de cada uno de ellos, colocados en orden decreciente según la puntuación obtenida y cada una de las desventajas generadas en las condiciones actuales del pozo. La ventana de jerarquización permite al usuario seleccionar el conjunto de métodos más prometedor desde el punto de vista técnico, para los cuales se realizará el diseño y la evaluación económica. En la figura N°1.6.4 se observa la ventana del resultado de la preselección y la figura N° 1.6.3 muestra el esquema del módulo de preselección.



Fuente: Reyes, Yamila. (1999)

Figura 1.6.3.



Fuente: Reyes, Camila. (1999)

FIGURA N°1.6.4 ESQUEMA DEL MÓDULO DE PRESELECCIÓN

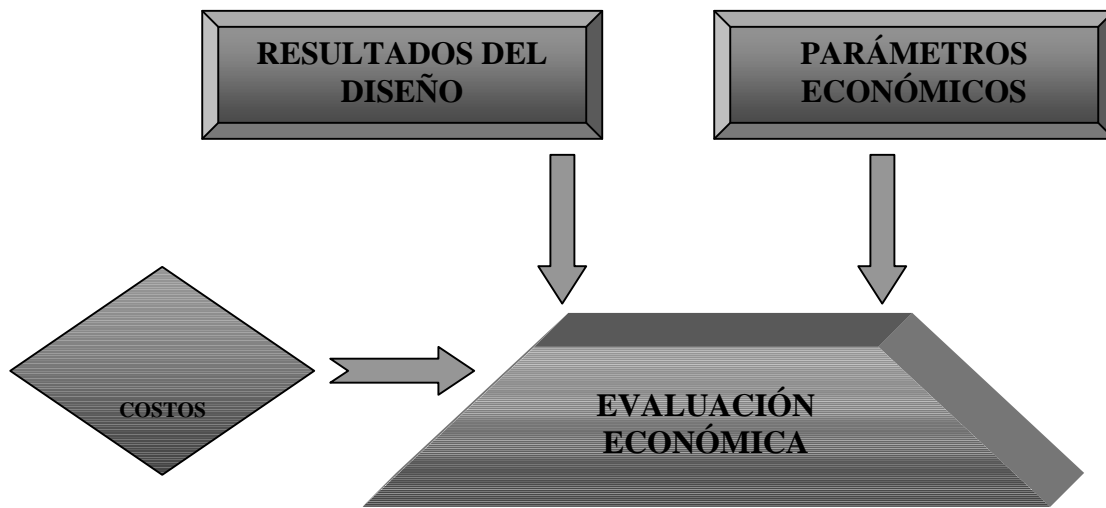
MODULO DISEÑO

Este módulo tiene como finalidad asistir al ingeniero en el diseño de los diferentes equipos que conforman los métodos de Levantamiento Artificial, de acuerdo con las sugerencias realizadas en el módulo de preselección técnica. Empleando una serie de programas especializados o simuladores desarrollados para cada uno de los métodos. Para cada programa de diseño son solicitados al usuario datos adicionales que no fueron introducidos para la preselección. El resultado obtenido en el dimensionamiento de los equipos en forma numérica y algunos casos complementados con gráficas.

MÓDULO DE EVALUACIÓN ECONÓMICA

Es necesaria una evaluación económica preliminar, es posible gracias al tercer módulo del sistema. Este módulo evalúa el método en términos económicos visto como proyecto de inversión. En línea con los resultados del diseño, con los costos unitarios de los equipos y a partir de parámetros económicos establecidos (año de base de estudio, horizonte económico y paridad cambiaria), se calculan los indicadores económicos de importancia para el proyecto en el horizonte económico indicado, los cálculos se realizan en dólares constantes para el año base de estudio y sin tomar en cuenta la inflación. Los indicadores económicos que permiten calcular el SEDLA son: tasa interna de retorno (TIR), Valor Presente Neto (VPN) Y Eficiencia de Inversión (EI).

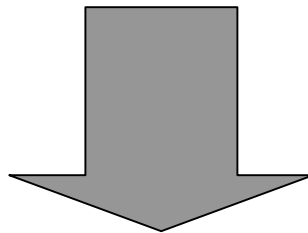
Además el módulo permite visualizar de manera tabular la información de costos de: servicios, mantenimiento, seguros, gastos de operación, contingencia, depreciación, regalías, ingresos, impuestos, flujo de cajas (división, PDVSA, nación). En la figura N° 1.6.5 se observa el esquema del módulo de evaluación económica.



Fuente: Reyes, Yamila. (1999)

FIGURA N° 1.6.5

ESQUEMA DEL MÓDULO DE EVALUACIÓN ECONÓMICA



Este módulo toma los datos de costos unitarios de los equipos necesarios, tales como: equipo de superficie y subsuelo, equipos de servicio, estructuras y tarifa energética, de una base de datos contenida en el cuarto módulo del sistema. Para lograr una evaluación más representativa, estos costos se encuentran sectorizados por campo y área geográfica.

MODULO DE BASE DE DATOS

Es el cuarto *módulo* del sistema y permite manejar las diferentes tablas empleadas por el mismo, estas comprenden:

- Los catálogos: se almacena la información de los equipos del subsuelo y superficie, las estructuras y sus especificaciones técnicas, los equipos de servicios, gastos de producción, áreas geográficas y métodos de levantamiento artificial. Los catálogos están agrupadas en combinaciones y lista de costos unitarios. En las combinaciones se muestra la selección entre el método de levantamiento y los distintos equipos y servicios que necesita. La lista de los costos unitarios contiene los costos de cada uno de los equipos involucrados en cada método de levantamiento.

- Factores y Parámetros del Módulo de Preselección: estas tablas contienen los factores y parámetros que forman la base de conocimientos en el método de preselección técnica, relacionan la experticia del sistema.

La importancia de este módulo radica en caso de no existir la información en las tablas, el sistema no realiza ninguna consulta ni actualización. Uno de los beneficios es permitir realizar actualizaciones en los costos unitarios de los distintos equipos que conforman cada método, obteniendo una mayor representación de la realidad en la evaluación económica.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DEL MODELO I. (SEDLA)

EL SEDLA, como Sistema de Experto tiene la ventaja, por ser el único procedimiento de optimización con *Módulo de Evaluación Económica* con relación a otros

modelos y/o procedimientos que se presentan a discusión en este estudio.

En la actualidad, como se mencionó anteriormente, es el único modelo que presentan un **Módulo de Evaluación Económica**, todos los modelos desarrollados anteriormente no tiene este módulo, el cual es de vital importancia para sustentar la decisión técnica de la optimización de los sistemas de levantamiento artificial.

El Módulo de experto o de preselección Técnica, fue recientemente actualizado y se incorporaron mejoras tales como: *evaluaciones, actualizaciones, correcciones a las reglas de preselección y mejoras a las estructuras de la base de conocimientos, mediante la incorporación de parámetros que reflejan avances técnicos y pericias adquiridas en los métodos de levantamiento artificial.*

Entre los **parámetros cuantitativos** destacan los siguientes: *Profundidad al tope de las Perforaciones, Temperatura al tope de las perforaciones, Índice de Productividad, Relación Gas-Líquido de formación, Tasa de producción bruta, Corte de agua, Presión estática de/yacimiento.*

Entre los **parámetros cualitativos**: *ubicación del pozo, volumen de gas disponible, disponibilidad de fuente eléctrica y necesidad de adaptación del método de declinación*, otros datos más relevantes para el modulo de preselección son el tipo de completación (simple, doble o selectiva), la longitud (0 a 20000'), el diámetro nominal del revestidor (2 3/8" a 10") y el diámetro nominal de los eductores (2 3/8" a 4 1/2").

La consulta a expertos, como los mencionados en la sección anterior, es sumamente importante, quizás es conveniente considerar que la experticia de estos investigadores es muy profunda y de un alto conocimiento de un sistema y/o dos sistemas de levantamiento artificial, pudiese correr el riesgo del sesgo, por la inclinación muy natural hacia un método en particular.

Se requiere actualización de los otros módulos: **Módulo de Base de Datos y Módulo de**

Evaluación Económica, esto se pudiera lograr bien por medio de trabajos especiales de grado, que pudieran realizar entre la **UCV / INTEVEP**.

Aparentemente el **SEDLA** funciona aceptablemente en las áreas del Occidente del País: Lago de Maracaibo, Campo Costanero de Bolívar.

Este sistema de Experto, tiene problemas hacia algunas de las áreas de Oriente del país, en especial en áreas de crudos pesados, extrapesados, Campo Morichal, Cerro Negro, Sur Monagas.

El **SEDLA**, pudiese tener buenas resultados en áreas como El Furrial, Anaco, San Tomé, etc.

La flexibilidad del Sistema Experto en cuánto a su constante modificación y la redefinición del problema incorporando nuevas experiencias adquiridas en el tiempo es sumamente poderosa y en consecuencia le da la posibilidad de incorporar nuevas tecnologías y/o mejoras tecnológicas de los distintos equipos de levantamiento (**Módulo de Diseño**), esto conlleva a una revisión periódica de dicho módulo para incorporar esas mejoras.

El **Módulo de Base de Datos**, también es necesario su revisión periódica en especial con relación a los catálogos, lo cual requiere una revisión bastante continua en especial con relación a los precios y también revisión indirecta de la base de conocimientos.

En la actualidad el **SEDLA** es el modelo más desarrollado y más completo de lo que se dispone en el mercado en el área de la optimización de los sistemas de levantamiento artificial.

En cuánto a las limitaciones que tiene el Sistema de Experto De Levantamiento Artificial (**SEDLA**), es conveniente en el futuro, emplearlo en:

Pozos Inclinaos y Pozos Horizontales y considerar la inyección de diluente en la producción de crudos pesados y extrapesados.

Otra de las limitaciones que **adolece el Sistema de Experto de Levantamiento Artificial (SEDLA)** es mayor vinculación con el binomio yacimiento / pozo.

Se toma en consideración valores como: *Índice de Productividad, Presión Estática del Yacimiento* pero no considera los *Mecanismos de Producción de los Yacimientos: Empuje Hidráulico, Gas en Solución, Presencia de Capa de Gas y la nueva Teoría de los Crudos Espumantes*, estos factores son en el **Yacimiento**, pero tienen una fuerte incidencia en la Producción de un Pozo y en la construcción de la curva de gradiente para la determinación del IPR.

Esto es una de las limitaciones más importante de esta poderosa herramienta desarrollada por PDVSA-INTEVEP.

Uno de las áreas a resaltar en el SEDLA, es la definición de los rangos de aplicación.

Es conveniente mencionar algunas de las mejoras recientes introducidas en el SEDLA, las cuales, fueron desarrolladas en el Trabajo de Investigación de Reyes: ***LINEALIZACIÓN DE COMPORTAMIENTOS, EXTRAPOLACIÓN DEL RANGO NEGATIVO DE EVALUACIÓN DEL COEFICIENTE DE CERTEZA, ACTUALIZACIÓN DE LIMITES FISICOS, ELIMINACIÓN DE REGLAS EXCLUYENTES, DETERMINACIÓN DE PUNTUACIONES IGUALES A 100 PARA CASOS IDEALES, REVISION Y CORRECCION DE ALGUNAS ECUACIONES, CORRECCIONES EN ALGUNAS ADVERTENCIAS, ACTUALIZACIÓN DE COMENTARIOS IDEALES.***

Es relevante destacar en este análisis y discusión del SEDLA, las conclusiones del Trabajo de Reyes en especial:

La referente a la actualización de las reglas de evaluación del sistema que mejora la calidad de la **preselección técnica**, hay que hacer notar que la actualización es relativa, ya que requiere una minuciosa revisión a través del tiempo y tomar en consideración factores como: **pericias adquiridas y cambios de tecnologías**.

Es importante destacar la eliminación de las reglas excluyentes, que afectaban la correcta selección, en especial a los métodos emergentes que vienen a ser: **bombeo electrosumergible y la bomba de cavidad progresiva**, estos métodos son los que realmente han avanzado más desde el punto de vista tecnológico para poder competir con métodos tradicionales como el **bombeo mecánico y el levantamiento artificial por gas**.

Trabajar y mejorar y a su vez actualizar los otros módulos del **SEDLA: Módulo de Base de Datos y el Módulo de Evaluación Económica** proponer un trabajo especial de grado para alcanzar ese objetivo.

Ampliar el criterio de jerarquización de los métodos en la preselección técnica, no sólo considerando la puntuación obtenida, sino también el número de desventajas asignadas.

Se debe continuar la actualización de las reglas de evaluación periódicamente, a medida que se adquiere mayor grado de pericia en los distintos métodos de levantamiento artificial, cuando se requiere la incorporación de nuevas tecnologías o cuando sea necesaria la desincorporación de tecnologías que ya no resultan aplicables.

Una de las propuestas para mejorar el módulo de evaluación económica, es permitir al usuario modificar externamente datos como: **flujos de cajas, Valor del impuesto, precio del crudo, precio del crudo marcador, etc**, de modo que dicha información sea actualizada periódicamente, sin necesidad de depender de las actualizaciones del programador en la estructura interna del sistema.

1.6.2 MODELO 2 – DMSOLA (PAJ y MCCV)

1.6.2.1 PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO

INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas fundamentales en la teoría de toma de decisiones, es obtener pesos o prioridades de un determinado número de variables o características a evaluar de acuerdo a su importancia. Esta importancia suele juzgarse en función de distintos criterios que pueden impactar o no a todas las variables. El pesaje de las variables con respecto a su importancia es la base de la toma de decisiones multicriterio dentro de la cual se insiste el Proceso Analítico Jerárquico (PAJ) como una de las múltiples técnicas de medición desarrolladas a la fecha en el área.

Esta técnica fue elaborada por Thomas Saaty en 1972 para resolver un problema específico de planeación de contingencias, adaptándolo posteriormente a la determinación de alternativas futuras de desarrollo del estado de Sudán.

El PAJ ha sido empleado por una diversidad de empresas y/o instituciones, entre las cuales se destacan: **IBM (1992), XEROX (1980), NASA.**

El PAJ puede ser aplicado a problemas reales, siendo útil para la asignación de recursos y planificación corporativa, análisis del impacto de políticas, resolución de conflictos, planificación de infraestructura y evaluación de recursos naturales (Saaty, 1982).

Para un análisis más profundo de esta técnica se sugiere revisar (*Saaty 1980 y Saaty 1994*).

EL EMPLEO DE JERARQUÍAS EN EL ENFOQUE MULTICRITERIO.

Jerarquía es una abstracción de la estructura de un sistema, en donde cada uno de los elementos que lo conforma consta de muchos elementos o factores, y que tiene por finalidad estudiar las interacciones funcionales de sus componentes y sus impactos en el sistema entero (Wilby, 1994).

La estructura se establece en las jerarquías y se va desarrollando hacia abajo, comenzando por el factor más general y menos controlable (**metas, objetivos, criterios y subcriterios**) y finalizando en el nivel de alternativas, las cuales suelen ser más concretos y controlables.

Un criterio útil para comprobar la validez de una jerarquía es determinar si los elementos de un nivel superior pueden utilizarse como atributos comunes para comparar entre sí, a los elementos del nivel inmediato inferior (Saaty, 1980).

El planteamiento anterior supone la independencia del nivel superior de la jerarquía. Entendiéndose que existe independencia entre dos elementos o factores cuando no existe interacción entre ellos, es decir, cuando es posible establecer intercambios entre cualquier par de elementos, sin considerar la influencia de los otros (Mondelo, 1996).

1.6.2.2 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

El PAJ es una teoría de medición aplicado a la **toma de decisiones multicriterio** que utiliza comparaciones entre parejas de criterios para alcanzar nivel de preferencia entre un conjunto de alternativas previamente seleccionadas (Saaty 1982). Para aplicar esta teoría de medición se hace necesario desagregar el problema en sus partes componentes o variables hasta llegar a un orden jerárquico de todas ellas asignar valores numéricos a los juicios emitidos y finalmente, determinar las propiedades de las variables en estudio.

La fundamentación matemática de **PAJ**, aparece detallada en el trabajo de Silva, se plantea un desarrollo matemático matricial, se introduce los conceptos de matriz recíproca.

Los vectores columnas, autovector, autovalores y por último se llega una expresión de una matriz de comparaciones entre parejas empleadas en el **PAJ**.

1.6.2.3 LA ESCALA DE COMPARACIONES

Al realizar estimados, la unidad de decisión debe tener en cuenta todos los elementos a ser comparados. (Miller, 1956) afirma que el cerebro humano puede procesar simultáneamente 7 ± 2 elementos. Este límite psicológico entre comparaciones simultáneas, sugiere que si se toman 7 ± 2 elementos que se diferencian ligeramente unos de los otros, se necesitarán 9 puntos para distinguir estas diferencias.

Tomando en cuenta lo anterior, el **PAJ** emplea la escala de comparación que se presenta en la Tabla N° 12, la cual proporciona los valores de los juicios que deben ser insertados en la matriz de comparaciones entre parejas (Saaty y Vargas, 1991).

TABLA N° 1.6.I

ESCALA DE PRIORIDADES EMPLEADAS EN PAJ

ALTERNATIVA A RESPECTO A LA ALTERNATIVA B	
1	Igual importancia
3	Moderada importancia de uno sobre otro
5	Fuerte o esencial importancia
7	Muy fuerte o demostrable importancia
9	Extrema importancia
2,4,6,8	Valores intermedios o de compromisos recíprocos para comparación inversa

Como se ha hecho mención, por tratarse de una matriz recíproca, la diagonal principal esta compuesta por una (1), ya que un elemento es igualmente importante cuando se compara consigo mismo y, para las comparaciones inversas, de B con respecto A, Saaty sugiere insertar el valor recíproco.

Es importante mencionar que la *escala de calificaciones* empleada en el **PAJ** se aplica para la medición de atributos similares en orden de magnitud y que de lo contrario el valor obtenido pierde significado y precisión (Saaty y Vargas, 1991).

Todas las comparaciones y cálculos efectuados a través del proceso, establecen las prioridades de los elementos de un nivel dentro de una jerarquía, con respecto a un elemento del nivel inmediato superior.

1.6.2.4 VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL MÉTODO

Numerosas son las **VENTAJAS** encontradas en el **PAJ**, respecto a otras metodologías de pesaje, entre ellas se tiene:

- Permite el estudio de los problemas de forma holística, al identificar, entender y evaluar todas las partes que componen el Sistema de estudio.
- El modelo proporciona a los individuos o grupos la capacidad de formular sus ideas y definir problemas a través de sus propias suposiciones, derivando la solución de las mismas [Saaty, 1980].
- Es lo suficientemente flexible como para permitir su revisión una vez formulado por cuanto la unidad de decisión puede, tanto expandir los elementos dentro de la jerarquía como cambiar sus juicios respecto a todos ó algunos de los elementos en estudio.
- Se evalúa la sensibilidad de los resultados, sin importar el tipo de cambio que pueda considerarse de forma anticipada [Saaty, 1980].
- Es una técnica que sirve de complemento a otras (Análisis Costo – Beneficio, Minimización de Riesgos, Prioridades) para el proceso de toma de decisiones.
- Es una metodología que necesita el convencimiento de la unidad de decisión, hace que tenga mayor confianza en los resultados que se obtenga en el proceso [Mondelo 1996-1].

- Se emplea tanto para atributos mensurables como para aquellos que no pueden ser cuantificados y medidos.
- Toma en cuenta elemento de una jerarquía, aunque su prioridad sea baja, no tiene sentido “alternativas irrelevantes” dentro de la jerarquía [Saaty, 1980].
- El PAJ acepta un cierto grado de inconsistencia de los juicios, proporcionando una manera de cuantificada, permitiendo a la unidad de decisión la reconsideración de sus juicios [Pinawati, 1996].

A pesar de las numerosas ventajas el **PM** tiene las siguientes **LIMITACIONES**:

- El número de iteraciones requeridas para la generación de la matriz de comparaciones, llega a ser considerablemente alto en función del número de atributos o variables y niveles jerárquicos considerados [Lim y Swenseth 1993], por lo que mientras más complejo resulta el problema en estudio, mayor número de comparaciones deberán efectuarse, en el consecuente cansancio de la unidad de decisión.
- Se supone la utilidad de la unidad de decisión como una función aditiva, es decir, sus objetivos son mutua y preferencialmente independientes y esto no se comprueba [Sánchez, 1997].
- Cuando la unidad de decisión debe emitir un juicio sobre una variable altamente especializada, se necesita la presencia del(os) experto(s) durante el desarrollo de la evaluación.
- Incapacidad del método para mantener el orden de preferencias (fenómeno de inversión de preferencias) luego de la adición o eliminación de una alternativa.

- Cuando las variables a ser evaluadas no son del mismo orden de magnitud, encontrándose que un factor no puede ser estrictamente evaluado con respecto a otro, deben efectuarse técnicas de agrupación de manera que las comparaciones se efectúan dentro de los grupos así formados [Saaty y Vargas,199 1].

1.6.2.5 METODO DE CURVAS DE VALORACION (MCV)

Es una modificación del **Método de Construcción de Curvas de Valoración** desarrollado originalmente por Carrasquero⁴² para aislar y explorar un conjunto de soluciones de compromiso, el cual fue específicamente adaptado para el caso de la estimación interactiva de curvas de valoración. Para un mayor nivel de detalle de esta técnica, revisar el trabajo original del autor.

El **Método de Curvas de Valoración** no es tan refinado como el **Método de la Construcción de Curvas de Valoración**, pero si es más versátil y práctico a la hora de realizar estudio en el comportamiento de ciertas variables en un predeterminado intervalo de estudio.

1.6.2.6 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

Este método pretende crear a través de la interacción con la unidad de decisión producir algún tipo de orden sobre los distintos valores que puede tomar una variable dada, para producir un resultado acorde a las preferencias de la unidad de decisión.

El concepto de curva de valoración desarrollado por Carrasquero, se fundamenta en el esquema de B. Roy, establece las cuatro relaciones binarias que se ilustran en la Tabla

TABLA N°1.6.2

**LAS SITUACIONES FUNDAMENTALES DE PREFERENCIA Y RELACIONES
BINARIAS ASOCIADAS**

SITUACION	DEFINICION	RELACIÓN BINARIA Y PROPIEDADES
INDIFERENCIA	Cuando existen razones claras y positivas que justifican una equivalencia entre dos opciones.	I: relación simétrica y reflexiva
PREFERENCIA ESTRICTA	Cuando existan razones claras y positivas que justifican una preferencia significativa a favor de una de las opciones.	P: Relación simétrica (irreflexiva)
PREFERENCIA DÉBIL	Cuando existan razones claras y positivas que justifican una referencia a favor de una de las opciones, pero tales razones son insuficientes para discernir entre una preferencia estricta y una relación de indiferencia.	Q: Relación Asimétrica (irreflexiva)
NO COMPARABILIDAD	Cuando hay ausencia de razones claras positivas que justifiquen una de las relaciones anteriores.	R: Relación simétrica e (irreflexiva)

Fuente: Carrasquero, 1996; Roy, 1985

El método de **curvas de valoración** también toma estos mismos principios en la elaboración de las **curvas de valoración**.

1.6.2.7 SEMEJANZAS Y DIFERENCIAS ENTRE MÉTODOS DE CURVAS DE VALORACIÓN Y MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN DE CURVAS DE VALORACIÓN

SEMEJANZAS

- **Método de Curvas de Valoración**, las abscisas correspondientes a una barra de calificación superior a otra, representan soluciones que gozan de mayor preferencia al igual que el método original.

- En ambos los valores de las abscisas, tienen como imagen el mismo valor, están

asociadas a soluciones que tienen un mismo nivel de preferencia, pues reciben calificaciones similares; hay razones para suponer que ante todas ellas la **unidad de decisión** es indiferente.

- El método propuesto por *Carrasquero* para la construcción de estas curvas, se centra en la generación de puntos en zonas donde se presentan las mayores desviaciones en los juicios emitidas por la unidad de decisión. Las calificaciones que otorga esta se efectúan por comparación entre la variable en estudio y el valor más deseado de dicha variable en estudio, conocido como valor prototipo o ideal.
- Entre dos barras claramente distintas, hay un cambio en las calificaciones que otorga la **unidad de decisión**, existe un cambio en sus preferencias, ya que se atraviesa cierto umbral que permite discernir las preferencias de la **unidad de decisión** sobre las soluciones ubicadas en ambas barras.

DIFERENCIAS

- En el **Método de Construcción de Curvas de Valoración**, las abscisas correspondientes a una barra con una media calificación están asociadas a soluciones que poseen la mayor preferencia y en **Método de Curvas de Valoración** la de mayor preferencia es asignada mediante previo estudio de este intervalo en comparación con el valor prototipo previamente establecido.
- En el **Método de Construcción de Curvas de Valoración** los intervalos de estudios en comparación con el valor prototipo son el producto de múltiples interacciones con la unidad de decisión mientras que el **Método de Curvas de Valoración**, estos intervalos ya están predefinidos por el usuario para evitar posibles cansancios de la unidad de decisión.

1.7.1 LA ESCALA DE COMPARACIÓN

El Método de las curvas de valoración, utiliza una escala de calificación fundamentada en las calificaciones sugeridas por el Prof. Escalona, pero siguiendo los principios utilizados por Saaty en su **Proceso Analítico Jerárquico**. Esta condición establece el primer vínculo entre ambas metodologías y permite el desarrollo del estudio de Silva¹¹.

La escala de calificación, para el desarrollo de las curvas de valoración, consta de nueve puntos, dando lugar a cinco categorías claramente diferenciadas, estas se describen en la Tabla N° 1.6.3

TABLA N° 1.6.3
ESCALA DE CALIFICACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE VALORACIÓN

VALOR	DEFINICIÓN	SIGNIFICADO
9	Excelente	La unidad de decisión no percibe razones para afirmar que el intervalo prototipo y el intervalo valor a calificar difieran en algo, por lo que su grado de similitud es el más elevado posible
7	Muy Bueno	La unidad de decisión percibe muchas razones para afirmar que el valor del intervalo prototipo y el valor del intervalo a calificar son semejantes, pero también percibe alguna diferencia, por lo que su grado de similitud es alto.
5	Bueno	La unidad de decisión percibe tantas razones de semejanza como de diferencias entre el valor de intervalo prototipo y el valor del intervalo a calificar por lo que su grado de similitud es medio.
3	Regular	La unidad de decisión percibe muchas razones para afirmar que el valor del intervalo prototipo y el valor del intervalo a calificar son distintos pero también percibe alguna semejanza, por lo que su grado de similitud es bajo.
1	Malo	La unidad de decisión no percibe razones para afirmar que el valor del intervalo prototipo y el valor del intervalo a calificar se parecen en algo, por lo que su grado de similitud es el más bajo posible.
2,4,6,8	Grado intermedio entre valores adyacentes	Estos valores se utilizan cuando se requiere un compromiso entre las situaciones descritas para valores adyacentes en la escala.

Fuente: Luis Silva, 2000

Por consiguiente, la curva de valoración a obtener dependerá de la capacidad de discriminación de la unidad de decisión sobre los valores del atributo y de la escala de calificación empleada. Se establece que la unidad de decisión es indiferente ante soluciones ubicadas en un mismo subintervalo de la escala de calificación empleada.

1.7.2 ANALISIS Y DISCUSION DEL MODELO 2

El análisis y discusión de este modelo, se fundamenta en el diseño de una metodología que condujo al desarrollo de un Sistema Óptimo de Levantamiento Artificial.

El programa de Selección de un *Sistema Óptimo de Levantamiento Artificial*, se desarrolló con la finalidad de suministrar al usuario, una herramienta de evaluación de los diferentes métodos de producción que son empleados comúnmente para el desarrollo de cualquier campo petrolero y lograr un mejor desempeño de los mismos.

Este programa explora zonas de aplicabilidad de ciertas variables en un determinado método de producción y ver como influyen estos cambios.

El programa es una herramienta de aprendizaje y de soporte para la toma de decisiones, posee la particularidad al usuario de poder modificar ciertos criterios de acuerdo a su experiencia ó adelantos en el área, le permita incorporar nuevos criterios; con el objeto de dar una respuesta más acertada en la selección de un método en particular.

COMENTARIOS SOBRE EL PROGRAMA

El Programa está desarrollado bajo técnicas de programación más versátiles que proporciona el ambiente gráfico de Windows 95 y Windows 98.

En el trabajo de Silva¹¹, se presenta el Esquema de Selección Automática, Pantalla de Registros de Datos, Pantalla Aparte, Configuración del pozo / yacimiento, Pantallas de

Datos Cualitativos, Esquema de Selección Manual, Pantalla modo Manual.

Se comentarán algunas de las **VENTAJAS** de esta última pantalla:

Esta parte del programa, se considera como modo experto ya que el usuario va a establecer cambios muy significativos en el método de evaluación, para la selección del método óptimo y método alternativo de producción.

Esta pantalla presenta tres (3) opciones de cambio al usuario:

La primera opción: permite al usuario modificar los pasos teóricos asignados por el estudio realizado para cierto método de producción.

La segunda opción: permite al usuario modificar o crear nuevas curvas de valoración de una o todas las variables para cualquiera de los métodos de producción considerados en estudios.

La tercera opción: considerada un poco más laboriosa y delicada, permite crear sus propias variables de selección, sus propios vectores de pesos, para cada uno de los métodos a estudiar.

También se comentará brevemente el Esquema de Selección Manual.

Se presentan *cuatro* opciones:

1.- Establecer sus propios pesos teóricos de las variables en estudio cada uno de los métodos que este desee modificar.

2.- Cambiar ó modificar las curvas de valoración asignadas a las variables en cada método a evaluar.

3.- Modificar la estructura del estudio del sistema, mediante cambios en las variables en estudio y creación de nuevas curvas de valor, establecer nuevos métodos a evaluar ó variantes a los métodos previamente seleccionados.

4.- No establecer modificaciones a los criterios.

Esas opciones presentadas permiten analizar la poderosa herramienta generada y se observa la versatilidad de ese problema al poder incidir el usuario en la creación de sus propias curvas de valoración, esta ventaja pudiese contradictoriamente tener la limitación de la calificación del usuario, por ejemplo, si el usuario, es una persona de poca experiencia en el área de la ingeniería de producción pudiese seleccionar pesos no adecuados que permitirían obtener curvas de valoración no representativas del problema planteado.

En cuánto a la comparación del Modelo 1 (SEDLA) y el Modelo 2 (PAJ y MCV) no se puede establecer de manera concreta que ventaja tendría un método con relación a otro, en lo que se refiere a la determinación de la jerarquía de los criterios y/o atributos.

Sería interesante realizar un estudio exhaustivo, que tome en consideración ó compare ambas metodologías de establecer las ventajas y limitaciones de una metodología con relación a la otra.

Anteriormente, se comentó acerca de la versatilidad y flexibilidad de la modificación de los pesos teóricos, y la creación de nuevas curvas de valoración y la posibilidad de sus propias variables de selección, sus propios vectores y pesos, todo esto para cada uno de los métodos en particular.

Indudablemente que es una ventaja muy importante, pero con la limitante, que debe ser una

persona ó experta en el área de ingeniería de producción que asuma esas propuestas de modificación y/o evaluación de los análisis propuestos, que sucede realmente con la vida productora de un pozo petrolero.

Otras pantallas, que se pueden ver en detalle en el Trabajo de *Silva* por: pantalla de la primera opción cambios y/o modificaciones en los pesos teóricos, pantalla cuestionario para crear nuevos pesos, pantalla cuestionario, pantalla para crear nuevas Curvas de Valoración, Pantalla para configurar nuevas curvas de Valoración.

Se comentará acerca de la Opción de agregar ó eliminar variables a los métodos de estudio, en especial, cuales son las **LIMITANTES**:

- Sólo se podrá estudiar los cinco (5) métodos de producción ya seleccionados en la lista.
- Agregar o eliminar hasta un máximo de veinte (20) variables responsables en la selección.
- Elaborar distintos vectores de pesos, para cada método de producción en estudio. Considerando los criterios establecidos en la escala de valoración, respondiendo un cuestionario para cada método a estudiar.
- Obligatoriedad de crear las curvas de valoración para cada una de las variables seleccionadas, en cada método que se considere a evaluar.

METODOLOGIA

GENERALIDADES

El Objetivo de este capítulo es el de proporcionar información detallada acerca de cómo se realizó el estudio, describiendo el proceso de la investigación como tal, el material y los instrumentos utilizados y el procedimiento usado, buscando como objetivo “permitir evaluar la validez y adecuación que tuvieron o tendrán los métodos e instrumentos utilizados o los que se proponen” (Van Dalen y Meyer, 1984, citado por Ibáñez Berenice)

Es de vital importancia para este trabajo resaltar la importancia de este capítulo debido a que resume tal como lo resalta Tamayo en su libro *El Proceso de la Investigación Científica*: “La metodología constituye la médula del plan; Se refiere a la descripción de las unidades de análisis o de investigación, las técnicas de observación y recolección de datos, los instrumentos y procedimientos y las técnicas de análisis (p.91), por lo que se constituye en un capítulo especial para el desarrollo de aquí en adelante del Trabajo realizado.

2.1 FORMA DE LA INVESTIGACIÓN

Referente al grado de profundidad con el que se aborda un objeto o fenómeno, en nuestro caso se refiere a una investigación descriptiva porque en ella se busca la caracterización de un hecho, fenómeno o grupo con el fin de establecer su estructura o comportamiento en el caso nuestro, la implementación de la metodología de selección de una Familia Coherente de Criterios para la selección de Sistemas de Levantamiento Artificial, planteada por Carrillo y con la confiabilidad y validez ya demostrada, a pozos pertenecientes al Oriente del país, específicamente a pozos ubicados en La Faja Bituminosa del Orinoco.

2.2 TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

De acuerdo a los Objetivos planteados en el Planteamiento del Problema de nuestra investigación esta se ubica dentro de la denominada investigación Descriptiva, tal como lo

define Abouhamad, citado por Tamayo en el Proceso de la Investigación Científica, la investigación descriptiva es “interpretar lo que es” (p. 33)

Este hecho es reforzado por el hecho de que “Son las investigaciones descriptivas las más recomendables para una tesis de Pregrado pues una buena descripción solo puede si se domina un Marco Teórico que permita integrar los datos, y a la vez se tiene el rigor para ser confiables, completos y oportunos. Ellas permiten ir sedimentado conocimientos que serán utilizados por otros tesisistas o científicos, de modo tal que su utilidad se proyecta mucho más allá de los límites estrictos (Sabino, p. 89 y 90). Además hay dos buenas razones en este trabajo que justifican este tipo de investigación:

1. La literatura reveló que hay pedazos de teoría con apoyo empírico moderado que han definido y detectado algunas variables, adicionando otras, como lo son los denominados criterios de Selección de Sistemas de Levantamiento.
2. El Análisis de cómo es y se manifiesta un fenómeno y sus componentes, como lo es el proceso complejo de selección de Sistemas de Levantamiento Artificial, que agrupa variables de producción y yacimientos, así como también variables de tipo económico.

Es preciso resaltar que requiere de considerable conocimiento del área que se investiga para formular las preguntas específicas que se buscan resolver (Dankhe, citado por Sampieri 1986), por lo que la revisión bibliográfica ha sido exhaustiva.

La metodología planteada por Carrillo, basada en una Investigación Documental Bibliográfica, apoyada en fuentes bibliográficas y documentales permitió la Evaluación de los mecanismos de Producción petrolera, así como el establecimiento de una secuencia que abarca la definición del problema, Generación de la lista de Criterios, descarte de criterios y Estructuración de los criterios, para pozos pertenecientes al Oriente del país específicamente al Campo Cerro Negro.

Se ha complementado dicha metodología con la aplicación de un estudio de campo, en el que se les facilitó un cuestionario a expertos en el Área Ingeniería de Producción, así como también de especialistas ubicados en el oriente del país, específicamente en la selección de Levantamiento Artificial e Ingeniería de Yacimientos, en la zona antes señalada. Su uso se justificó debido a que en el estudio de campo se procura la descripción de los hechos a partir de un criterio teórico definido previamente (Sabino, 1986)

2.3 POBLACIÓN Y MUESTRA

La población “es la totalidad del fenómeno a estudiar en donde las unidades de población poseen una característica en común, la cual se estudia y da origen a los datos de la investigación” (Tamayo p.92)

En este contexto, se escogió un grupo de 5 especialistas en el área de producción y levantamiento Artificial lo cual se realizó mediante una selección adecuada de acuerdo a los objetivos previamente fijados, por lo cual se refirió a ese grupo como muestra buscando la representatividad adecuada tal como lo señala Tamayo “Esperamos, desde luego que lo que averiguamos sea cierto para la población en conjunto (P. 92)

Esto es fortalecido por lo referido por Sixto Hernández en su Estadística Aplicada a la Educación donde expresa: “Cuando un universo o población está conformada por 30 individuos o menos este universo es igual a la población

2.4 TECNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.

Para desarrollar el presente trabajo se utilizaron las siguientes técnicas de investigación:

1. La Revisión Bibliográfica: La cual aportó toda la información que permitió el desarrollo del marco teórico relacionado con los Sistemas de Levantamiento Artificial, los últimos trabajos realizados en esta área, así como las últimas innovaciones tecnológicas, como lo son los Sistemas expertos que permiten evaluar la implementación, revisión o cambio de los Sistemas de Levantamiento Artificial.

En su fase inicial el instrumento de recolección de Datos lo constituyó la ficha de trabajo la cual es “el instrumento que nos permite ordenar y consultar los datos estudiados incluyendo nuestras observaciones y críticas facilitando así la redacción por escrito. (Tamayo, p. 98). El particular se implementó la de tipo Bibliográfica mixta, la cual nos permite “al hacer un resumen o párrafo de un texto encontramos ciertos inconvenientes para resumir algunas ideas que en el se expresan y tenemos que copiarles textualmente” (Balestrini, 1987).

El otro instrumento que se utilizó fue la ficha concepto la cual nos permite transcribir una definición que elabora determinado autor de un determinado concepto.

Entrevistas: En la segunda fase de desarrollo de la metodología se procedió a realizar una serie de preguntas estructuradas que permitieron obtener respuestas confiables sobre el proceso de escogencia de criterios en la selección de los Sistemas de Levantamiento Artificial. Estas preguntas se estructuraron en abiertas y cerradas, estas últimas con la finalidad de permitir al entrevistado la respuesta de su parecer más apropiada, pudiendo complementarla sin limitaciones de tipo semántico.

El instrumento de recolección de datos que se ha presentado para recoger la información necesaria es el cuestionario, el cual garantiza el diseño con preguntas de final abierto, para garantizar la libertad de ideas expresado por el entrevistado, y cerrados, llamados también de alternativas fijas que formalizaron más el cuestionario, donde al entrevistado un número limitado de respuestas posibles de acuerdo a su selección o alternativa. (Sabino, p. 130)

Las razones porque hemos implementado este instrumento son las siguientes:

1. Su conocimiento de la realidad es primario, no mediado, y por lo tanto, menos engañoso.
2. Como es posible agrupar los datos en forma de cuadros estadísticos, se hace más accesible la medición de las variables.
3. Es un método de trabajo relativamente económico y rápido.

Las desventajas más frecuentes son:

La encuesta recoge la visión que la gente tiene de sí misma: no es lo mismo lo que la gente hace, siente o cree, que lo que la gente “dice” que hace, siente o cree. Existen algunos recursos para reducir la magnitud de este serio problema, como omitir algunas preguntas que sabemos que las personas no quieren responder, es necesaria la presentación del entrevistador, etc.

1. La encuesta relata los hechos sociales desde el punto de vista de sus actores, pero no considera las relaciones sociales interpersonales o institucionales, lo que la hace vulnerable cuando se anda en la búsqueda de un consenso.
2. El diseño es básicamente estático. Tiende a dar una imagen instantánea de un determinado problema, pero no nos indica sus tendencias.
3. El tratamiento de la información es estadístico. Esto puede resultar muy democrático y útil, pero casi nunca se corresponde con la realidad de los hechos sociales, donde el liderazgo y la asimetría social son la norma.

El cuestionario estuvo integrado por 7 ítem con la finalidad de lograr los lineamientos trazados en el capítulo de Planteamiento del Problema, basados en el cuestionario diseñado por Carrillo, pero adaptado a las exigencias y realidades que presenta el oriente del país, punto este final objetivo primordial de este trabajo. El cuerpo del cuestionario está integrado por 5 preguntas, adecuadas a los objetivos específicos fijados en el planteamiento del problema, por lo que su elaboración ha sido cuidadosamente planificada para alcanzar las metas fijadas y señaladas en la tabla 4.1.1

PREGUNTA	DESCRIPCION	OBJETIVO ESPECIFICO
1	¿Qué criterios influyen en la selección del sistema de Bombeo mecánico en el área del oriente del país?	1
2	¿Qué criterios influyen en la selección del sistema de Bombeo de Cavidad Progresiva en el área del oriente del país?	1
3	¿Qué criterios influyen en la selección del sistema de Bombeo Electrosumergible en el área del oriente del país?	1
4	¿Según las experiencias del Sistema en la zona del Oriente, cuales son las fortalezas que presenta el sistema de Bombeo Mecánico en el área del Oriente del país?	2
5	¿Según las experiencias del Sistema en la zona del Oriente, cuales son las fortalezas que presenta el sistema de Bombeo de Cavidad Progresiva en el área del Oriente del país?	2
6	¿Según las experiencias del Sistema en la zona del Oriente, cuales son las fortalezas que presenta el sistema de Bombeo Electrosumergible en el área del Oriente del país?	2

Tabla Nro. 4.1.1

Fuente: Carrillo, Jesús (2001)

Adaptación. Solórzano, Cipriano (2003)

2.5 Confiabilidad y validez.

Para esta investigación la meta fijada fue lograr alcanzar la suficiencia de muestreo esto es el grado máximo de confiabilidad de la muestra: Para ello, hemos se ha integrado a la muestra a un cuerpo de especialistas, con lo cual se alcanza la condición de confiabilidad definida por Tamayo como “la condición en la cual condiciones repetidas de los mismos fenómenos con un mismo instrumento presentan resultados similares. Este muestreo es de

tipo intencional u opinático, ya que en el “El investigador obtiene información de unidades de población escogidas de acuerdo a criterios preestablecidos, seleccionando representantes” (Bautista, 1998), siendo estos criterios agrupados en la condición de expertos. Esto se reforzó con la implementación de una prueba piloto aplicada dos personas cuyas características son similares a las mostradas por el muestreo intencional, lo cual permite dar garantía de éxito en la confiabilidad del instrumento aplicado.

La validez según Valbuena en su Evaluación en el Proceso de Enseñanza del Aprendizaje, la define como una técnica que consiste en someter a evaluación de un conjunto calificado de personas, elementos o etapas de un proyecto o programa de innovación a los fines de obtener su opinión acerca de la validez, relevancia, factibilidad, coherencia, tipo, deficiencia etc.... de los mismos”, por lo cual se ha garantizado con la aplicación de muestreo intencional la validez del proyecto.

2.6 Técnicas de Análisis.

Los resultados obtenidos en forma cuantitativa de los cuestionarios se analizaron y clasificaron con base a escalas de intervalos iguales mutuamente excluyentes basado en las escalas sugeridas por experiencias previas a esta en la aplicación del cuestionario. Estas se graficaron con el uso del programa Excel y de forma sencilla de forma de círculos estadísticos ó diagramas de barras y los cualitativos se agruparon de acuerdo a la naturaleza de las respuestas.

2.7 MATRIZ METODOLÓGICA.

A continuación se presenta un resumen de la planificación inicial del trabajo, donde se resume las actividades realizadas, así como las técnicas utilizadas, en la siguiente tabla 4.2

Objetivo específico	Actividades realizadas	Instrumentos utilizados
Seleccionar los criterios de selección de producción petrolera usados en el oriente del país, empleando la metodología aplicada por Carrillo	<ul style="list-style-type: none"> - Se recopiló datos sobre los criterios que afectan al Bombeo Mecánico, Bombeo Electrosumergible y Bombeo de Cavidad Progresiva. - Se realizaron tablas de observación sobre el comportamiento de los criterios en BM, BCP y BES. - Se realizaron entrevistas. - Se redactaron conclusiones. 	Fichas Bibliográficas. Tablas comparativas. Cuestionarios de preguntas abiertas y cerradas.
Determinar las fortalezas que presentan los más usados en el oriente del país	<ul style="list-style-type: none"> - Se determinaron las fortalezas de los sistemas más usados en el oriente del país. - Se entrevistó al personal vinculados al área de producción en el oriente del país. - Se realizaron entrevistas. - Se redactaron conclusiones. 	Fichas bibliográficas. Cuestionarios.
Determinar las limitaciones que presentan los más usados en el oriente del país	<ul style="list-style-type: none"> - Se determinaron las limitaciones de los sistemas más usados en el oriente del país. - Se entrevistó al personal vinculados al área de producción en el oriente del país. - Se realizaron entrevistas. - Se redactaron conclusiones. 	Se realizó una matriz, para evaluar las debilidades y amenazas que presentan los sistemas en cuestión. Listado de variaciones. Cuestionarios de preguntas abiertas y cerradas.
Analizar los modelos implementados en la selección de Sistemas de Levantamiento Artificial, específicamente el SEDLA y DMSOLA	<ul style="list-style-type: none"> -Se estudio las metodologías del SEDLA y DMSOLA. -Se establecieron tablas comparativas entre las dos metodologías. -Se establecieron ejemplos prácticos. -Se redactaron conclusiones. 	Fichas Bibliográficas. Tablas comparativas. Cuestionarios de preguntas abiertas y cerradas.
Realizar una corrida de ambos a partir de información de Data de la Faja Bituminosa del Orinoco, para establecer comparaciones entre ambos sistemas para un mismo caso	<ul style="list-style-type: none"> -Se tomo data de campo de los registros de producción en la faja petrolífera del Orinoco. -Se cargaron los datos en ambos programas. -Se redactaron conclusiones. 	Se recopiló data confiable de la Faja Petrolífera del Orinoco de los registros de los convenios operativos. Se redactaron conclusiones.

TABLA 4.1.2

Fuente: Elaboración Propia

La metodología está basada en 4 etapas, que obedecen generalmente a plenitud las teorías de generación de criterios, pero adaptadas al proceso analítico jerárquico, desarrollado por Tomas Saaty, debido a que estos obedecen a una posible clasificación o jerarquización.

A continuación se hace una exposición breve y en lenguaje sencillo, de las partes que conforman cada una de las etapas que conforman dicha metodología, así como también una corta exposición en que consisten cada una de ellas. Es de hacer notar que para profundizar más acerca de esta metodología se recomienda ver la profundización teórica que hace Carrillo en su trabajo acerca del diseño de la misma, incluida como anexo en este trabajo.

La metodología consta de cuatro etapas. Estas cuatro etapas las podemos denominar de acuerdo al desarrollo de la generación de Criterios en:

Etapas 1: Definición del problema:

Es definir con claridad lo que la unidad de decisión pretende resolver. (Carrillo. P.94).

Etapas de gran relevancia para el diseño, debido al tiempo que se implementa en comprender la dificultad del problema. En ella se define el pensamiento de la unidad de decisión. Para ello se debe seguir las siguientes sub-etapas:

1. Definición del ente decisor: Descripción de cómo cada uno de los miembros de la unidad de decisión interpreta el problema, es decir los puntos de vista de los integrantes del equipo.
2. Definición del objetivo y la meta trazada del ente decisor: definición de los intereses de cada uno de los integrantes de la unidad de decisión.
3. Definición por parte del coordinador del problema planteado: Donde se concluye sobre lo planteado por la unidad de decisión y lo entendido por el coordinador.
4. Retroalimentación coordinador-unidad de decisión unidad de decisión-coordinador: Interacción recíproca entre coordinador y la unidad de decisión, para verificar que está definido el problema desde el mismo punto de vista. En caso de que no, se debe volver a la sub-etapa 1 de definición del problema.

En la figura 5.1 se presenta los componentes de esta etapa.

Generación de listas de Criterios:

En esta etapa la prioridad tal como lo indica su nombre, es la Generación de Listas de Criterios sin omisión por causa de jerarquización, mediante la búsqueda en fuentes bibliográficas con el objeto de buscar problemas similares al planteado. Aquí se permite la redundancia de criterios, para garantizar mediante posterior revisión, inclusión o eliminación de algunos de ellos. Es la fase de creatividad por excelencia, y la más flexible de la metodología. El coordinador centra su atención en las variables de entrada y salida del mismo, constituyendo una especie de caja negra

Posteriormente se procede a la búsqueda de otros criterios mediante otras técnicas de búsqueda, tales como: Interacción, Tormenta de Ideas, Comités, Método Sinéctico, Grupo Nominal, Método Delphi, Método de Kawasaki Jiro, Árbol de Decisiones, Reuniones electrónicas, Diagramas de causa-efecto, o cualquiera otra conocida por el coordinador. Es importante que en este caso se consulte acerca de la eficiencia de la técnica elegida de acuerdo a la conveniencia del problema a resolver por parte de la unidad de decisión y el coordinador. Todas estas técnicas tienen sus ventajas y limitaciones de acuerdo a la tabla ofrecida por la General Electric donde se muestran los criterios de eficiencia de los métodos implementados (ver apéndice). En ella se analizan el grado de eficiencia de cada una de las técnicas anteriormente nombradas. En resumen, Esta etapa es la que permite la generación de criterios, mediante la discusión sobre la inclusión o no de estos de acuerdo a lo que el ente decisor desea y con lo que dispone para alcanzar el objetivo previamente fijado en la definición del problema.

Descarte de Criterios:

Es la fase de depuración de la información generada en la etapa anterior. El coordinador junto a la unidad de decisión elimina aquellos criterios de acuerdo al grado de importancia o grado de complicación que este conlleva dentro del contexto del problema, evitando la posible redundancia de un criterio, pudiéndose unificar este fenómeno previo su identificación en uno solo.

Estructuración de los Criterios:

Esta última incluye la Jerarquización, ponderación y valoración de los criterios resultado de la etapa anterior. Cada uno de ellos son evaluados y clasificados de acuerdo a su:

Orden de importancia.

Clasificación de los criterios.

Asignación de pesos relativos.

Prioridad.

Según asignación previa.

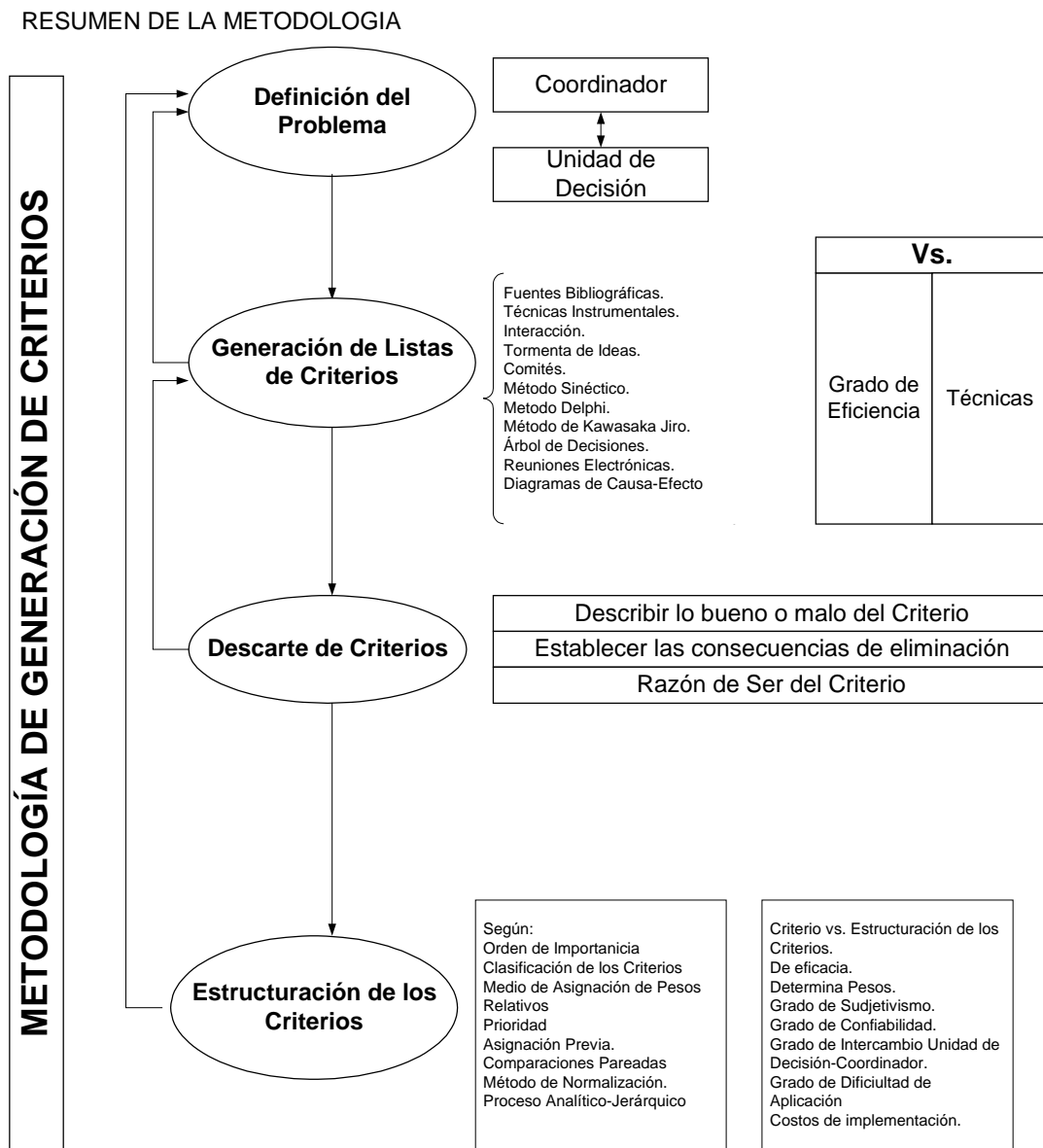
Comparaciones pareadas.

Método de Normalización.

Proceso Analítico Jerarquico.

Cada una de ellas posee un grado de confiabilidad, dificultad, costo, requerimientos computacionales, requerimientos matemáticos, grado de subjetivismo, afinación de pesos, etc. Para mayor profundización ver apéndices.

Posteriormente a esto se procede de nuevo a la una revisión general de criterios entre el coordinador de los expertos y la unidad de decisión; siendo esta de considerable importancia ya que se habrá creado una mayor relación entre estos y un mayor conocimiento de los criterios a determinar. En la figura # () se ilustra en forma generalizada estas etapas:



Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.2.1



**ANÁLISIS DE LOS
RESULTADOS**

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Definido el problema en el capítulo I, se procedió a realizar la fase siguiente de la metodología, en la cual se contempla la correspondiente generación de criterios.

Siguiendo a cabalidad y cumpliendo con la metodología planteada en el capítulo anterior, se elaboró una lista de criterios que influyen en la selección de Sistemas de levantamiento Artificial, con lo cual se encuentra la solución a los objetivos planteados correspondiente a primera fase de la definición del problema.

Tomando como base la información obtenida de la bibliografía consultada y del Trabajo de campo consistente en una consulta a los expertos y especialistas conocedores de las características ofrecidas por el Campo, entre los cuales se encuentran especialistas de BITOR, y docentes de la Universidad, todos ellos con el perfil adecuado a la categoría de experto, se generaron en la segunda etapa de la metodología un total de 28 criterios.

Las reuniones electrónicas fueron los procedimientos más idóneos para recabar la información de campo. La dificultad para reunir el equipo completo fue una de las principales razones por la cual se implementaron, además de ser un componente que permite baja conflictividad y mucha mayor rapidez en la generación de los criterios. La interacción entre la Unidad de decisión y el coordinador permitió la depuración de los cuestionarios preliminares, adecuándolos individualmente a cada experto de acuerdo a lo expresado por ellos en el cuestionario preliminar, con el propósito de complementar la información recabada.

En la etapa de Descarte anteriormente citada, es necesario acotar que la depuración se realizó tomando en consideración su redundancia y poca importancia, y como algo innovador en la metodología se incluyó criterios derivados del carácter económico implícito en cada sistema de levantamiento, siendo objetados por los expertos aquellos criterios de índole teórica que no aplicaban para la realidad del Campo Cerro Negro, lo que hizo más eficiente y óptimo el análisis de la matriz, por dos razones primordiales:

Simplificación del trabajo de los especialistas, y simplificación de las dimensiones del problema por razones de consistencia en la búsqueda de los resultados obtenidos.

De esta manera se obtuvieron los 21 criterios que fueron listados y analizados, que a continuación se presentan:

1. Índice de Productividad.
2. Tasa de Líquido.
3. Corte de Agua.
4. Relación Gas-liquido.
5. Comportamiento de Afluencia.
6. Profundidad de Asentamiento de la Bomba.
7. Presión Estática del Yacimiento.
8. Gravedad API.
9. Temperatura en el Fondo.
10. Problemas de Arenamiento.
11. Mecanismos de Producción.
12. Pericia en el Método.
13. Diámetro en del Revestidor.
14. Diámetro del Eductor.
15. Tipo de Completación.
16. Grado de Desviación del Pozo.
17. Producción Parafinas y Asfáltenos.
18. Acumulación de Escamas.
19. Problemas de Corrosión.
20. Consumo Eléctrico.
21. Viscosidad.

Luego se analizaron cada una de las fortalezas ofrecidas por cada uno de los diferentes métodos que operan en el Campo Cerro Negro, por lo que se generaron, a partir de la

consulta a los expertos de acuerdo a sus criterios en base a su experiencia, por pertenecer estos a una filial de PDVSA con amplia trayectoria y conocimiento en el campo Cerro Negro, generando elementos de juicio que reforzaban la información contenida en los cuestionarios en la primera fase, y alcanzándose las razones que hacen de estos sistemas idóneos. Esta fase definitivamente obedece a la experiencia de los expertos, y se adapta de la bibliografía consultada con la incorporación de nuevos criterios muy importantes que operan en el Campo Cerro Negro. A continuación se presenta la discusión.

Pregunta 1

Al consultársele a la muestra: ¿Qué criterios influyen en la selección del bombeo Mecánico? La muestra respondió de la siguiente manera.

CRITERIOS	SI	%	NO	%
Agotamiento del yac.	4	80	1	20
Consumo eléctrico	3	60	2	40
Tipo de Pozo	4	80	1	20
Desv. De Hoyo	3	60	2	40
Diámetro del Rev.	3	60	2	40
Avenamiento	3	60	2	40
Diámetro del Eductor	3	60	2	40
API	2	40	3	60
Comp. Afluencia	2	40	3	60
RGL	2	40	3	60
Q	2	40	3	60
Pe	4	80	1	20
Ip	4	80	1	20

Fuente: Elaboración Propia

Tabla Nro 5.1.1

La muestra concluyó que los criterios que más influyen en la selección de los Sistemas del Sistema de Levantamiento Artificial de Bombeo Mecánico en el Campo Cerro Negro son los que a continuación se enumeran:

- 1. INDICE DE PRODUCTIVIDAD.**
- 2. TASA DE LÍQUIDO.**
- 3. RELACIÓN GAS-LIQUIDO.**
- 4. PRESIÓN ESTÁTICA.**
- 5. GRAVEDAD API.**
- 6. ARENAMIENTO.**
- 7. DIÁMETRO DEL REVESTIDOR.**
- 8. DIÁMETRO DEL EDUCTOR.**
- 9. DESVIACIÓN DEL HOYO.**
- 10. COMPORTAMIENTO DE AFLUENCIA.**
- 11. TIPO DE POZO.**
- 12. CONSUMO ELÉCTRICO.**
- 13. AGOTAMIENTO DEL YACIMIENTO.**

Con referencia a la pregunta 2 acerca de los criterios que influyen en el Bombeo de Cavidades Progresivas, respondió de la siguiente manera:

Pregunta 2

CRITERIOS	SI	%	NO	%
Corrosión	3	60	2	40
Diam Revestidor	2	40	3	60
Desviación Pozo	3	60	2	40
Viscosidad	4	80	1	20
Corte de Agua	2	40	3	60
Temperatura	5	100	0	0
Diam. Del Eductor	5	100	0	0
Comportamiento Afl.	3	60	1	20
Avenamiento	5	100	0	0
API	4	80	1	20
RGL	5	100	0	0
Q	2	40	3	60
Pe	4	80	1	20
IP	4	80	1	20
Comportamiento fluidos-elastómero	3	60	2	40
Prod. Sólidos	4	80	1	20

Tabla Nro. 5.1.2

Fuente: Elaboración Propia

La muestra concluyó que los criterios que más influyen en la selección de los Sistemas del Sistema de Levantamiento Artificial de Bombeo de Cavidades Progresivas en el Campo Cerro Negro son los que a continuación se enumeran:

- 1. CORROSIÓN.**
- 2. DIÁMETRO DEL REVESTIDOR.**
- 3. DESVIACIÓN DEL HOYO.**
- 4. VISCOSIDAD.-**
- 5. CORTE DE AGUA.**
- 6. TEMPERATURA.**
- 7. DIÁMETRO DEL EDUCTOR.**
- 8. COMPORTAMIENTO DE AFLUENCIA.**
- 9. ARENAMIENTO.**
- 10. GRAVEDAD API.**
- 11. RELACIÓN GAS-LÍQUIDO.**
- 12. TASA DE LÍQUIDO.**
- 13. PRESIÓN ESTÁTICA.**
- 14. INDICE DE PRODUCTIVIDAD.**
- 15. COMPATIBILIDAD DE FLUIDOS-ELASTÓMEROS.**
- 16. PRODUCCIÓN DE SÓLIDOS.**

Con referencia al Bombeo Electrosomergible, la muestra evaluada señaló que los siguientes Criterios influyen en la selección de este sistema (Pregunta 3):

Tabla Nro.5.1.3

CRITERIOS	SI	%	NO	%
Mecanismo Prod.	1	20	4	80
Diámetro del revestidor	5	100	0	0
Desviación de Hoyo	2	40	3	60
Consumo Eléctrico	5	100	0	0
Viscosidad de Crudo	4	80	1	20
Diámetro del Eductor	2	40	3	60
Temperatura	4	80	1	20
Comp.. Afluencia	4	80	1	20
Avenamiento	4	80	1	20
Pe	3	60	2	40
API	3	60	2	40
Q	4	80	1	20
RGL	5	100	0	0

Tabla Nro 5.1.3

Fuente: Elaboración Propia

Con referencia al bombeo electrosumergible, la muestra evaluada señaló que los siguientes Criterios influyen en la selección de este sistema para el Campo Cerro Negro:

- 1. MECANISMOS DE PRODUCCIÓN**
- 2. DIÁMETRO DEL REVESTIDOR.**
- 3. DESVIACIÓN DEL HOYO.**
- 4. CONSUMO ELÉCTRICO.**
- 5. VISCOSIDAD.**
- 6. DIÁMETRO DEL EDUCTOR.**
- 7. TEMPERATURA.**
- 8. COMPORTAMIENTO DE AFLUENCIA.**
- 9. ARENAMIENTO.**
- 10. PRESION ESTÁTICA.**
- 11. GRAVEDAD API.**
- 12. TASA DE LÍQUIDO.**
- 13. RELACIÓN GAS-LIQUIDO.**
- 14. CORTE DE AGUA.**
- 15. INDICE DE PRODUCTIVIDAD.**

Al preguntar por las fortalezas de los sistemas que se utilizan en el Campo Cerro Negro, se obtuvieron los siguientes comentarios acerca de las fortalezas y debilidades de los sistemas de levantamiento artificial:

FORTALEZAS DEL BOMBEO MECÁNICO:

Sistema de Levantamiento de mayor auge en el mundo: Múltiples teorías que soportan el comportamiento del sistema completo y sobre todo en Venezuela donde se tiene una basta experiencia; Costo de reemplazo de la bomba relativamente más económico que las BCP y BES lo que lo hace más idóneo cuando se seleccionan Estos Sistemas. Disponibilidad de equipos electrónicos para diagnósticos de fallas en las bombas y sus componentes; filosofía de la automatización definida lo que permite un mayor control del pozo y del sistema en particular, fácil de bajar y sacar del pozo lo que le da flexibilidad, bajo consumo de energía debido a que no requiere de alto potencial eléctrico para operar los motores; adaptable para zonas de crudos pesados y extrapesados condición esta que lo hace apropiado para las características de los crudos presentes en el Campo Cerro Negro ; Sistema eficiente, simple y fácil de operar para el personal del campo, y sobre todo en Cerro Negro donde ya es tradicional y de uso común para todo el personal técnico; adaptable a completaciones sencillas y múltiples; flexible puede equipararse la tasa de desplazamiento con la capacidad del pozo cuando comienza a declinar; Disponible en diámetros diferentes; el sistema posee válvulas dobles lo cual le permite bombear tanto en la carrera ascendente como en la carrera descendente. Tiene buen tiempo de vida útil, sino hay presencia de arenas y corrosión, detalle este último que lo hace vulnerable en el Campo en Estudio.

DEBILIDADES DEL BOMBEO MECÁNICO:

Costo de Inversión alto, moderado manejo de finos; Definido ante la presencia de gas libre; Presencia de flotabilidad de cabillas ante crudos pesados y extrapesados; limitación por la profundidad de asentamiento de la bomba, inclinación del pozo y por los volúmenes de

fluidos a ser producidos; Presenta fallas por fatiga en el sistema de cabillas, MIF (entre 10-14 meses por servicio); Requiere revisión periódica del balance del equipo; limitaciones de uso en pozos profundos, Crea problemas en localidades urbanas; Es pesado y voluminoso en operaciones costa afuera; susceptible a los problemas de parafinas.

FORTALEZAS DEL BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE

Mayor capacidad de levantamiento; profundidad de asentamiento no importa inclinación del pozo, menor requerimiento de dilución (Diluyente crudo leona-22 API, en el caso de la FPO) por lo que es usado comúnmente en pozos horizontales de alto caudal en Cerro Negro y multilaterales, puede utilizarse en lugares lejanos o distantes de la estación de descarga; Maneja niveles de fluidos altos (aprox. 100000 BPD) De fácil diagnósticos; Bajo porcentajes de ocurrencia de filtraciones de crudo a nivel del cabezal del pozo; Bajo índice de fallas (TEF>18 Meses / servicio), lo cual reduce la pérdida de producción diferida; debido a su configuración genera calor al paso de fluidos por la bomba haciendo que disminuya la viscosidad; Separa el gas eficientemente; Filosofía de la automatización definida; puede usarse en pozos con temperaturas por debajo de 450° F, temperaturas propias de la localización en estudio: Costos de levantamiento relativamente bajos para volúmenes apreciables de fluido; Usando tuberías especiales para el manejo de fluidos corrosivos, puede tener larga duración; Mantiene el levantamiento de producción estable.

DEBILIDADES DEL BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE:

Costo de inversión alto; Moderado manejo de finos; deficiencia ante la presencia de gas libre; Limitación en profundidades de asentamiento en pozos con altos doglers (pata de perro); Altísimo consumo de energía; Requiere personal técnico altamente especializado para manejar y/o manejar el equipo del pozo, se comenzaron a utilizar en el campo a principios de los años noventa: La presencia de la arena afecta la bomba; La eficiencia volumétrica es afectada por la viscosidad del crudo, emulsiones y espumas siendo tal condición propia del Campo Cerro Negro: Escaso manejo de escamas y parafinas: Requiere un sistema de suministro eléctrico de alta eficiencia por la potencia requerida por los

motores de varias fases: Su uso es limitado por las altas temperaturas del yacimiento más el calor del motor que se genera, cuestión que no aplica para el área de Cerro Negro .

FORTALEZAS DE LA BOMBA DE CAVIDAD PROGRESIVA

Costo de inversión bajo, manejo de finos; bajo costo de mantenimiento , fácil de instalar y manejo en el pozo; Alta eficiencia en manejo de crudos pesados y extrapesados; bajo consumo ; Recomendable para zonas someras y media de profundidad; Bombas de alto caudal operadas a bajas frecuencias, pueden tener un tiempo de vida útil económicamente rentable, en fin una conclusión más o menos de consenso para la zona; Su uso común a futuro se ve impulsado en el área de Cerro Negro por las fortalezas que presenta que son propias de campo, debido a las mejoras experimentadas por el método.

DEBILIDADES DE LA BOMBA DE CAVIDAD PROGRESIVA:

Deficiente ante la alta relación gas petróleo; el elastómero está limitado por la presencia de H₂S, CO₂ y crudo con alto contenido de aromáticos y la presencia de arena; Limitación en la profundidad de asentamiento en pozos con altos dogers e inclinación; Levantamiento limitado (requiere disponer de pozos cercanos a la estación de descarga); No puede usarse en pozos con altas temperaturas (>200 F°); Alta caída de presión en la tubería de producción debido a la presencia de la sarta de cabillas: Poco uso en crudos livianos; Mediano índice de fallas TEF entre 10-12 meses de servicio); su vida útil disminuye con el incremento de las fallas y paradas sucesivas, altos costos de operación de equipos de superficie, cuestiones estas, rediseñadas y mejoradas para su mejor desenvolvimiento en el campo.

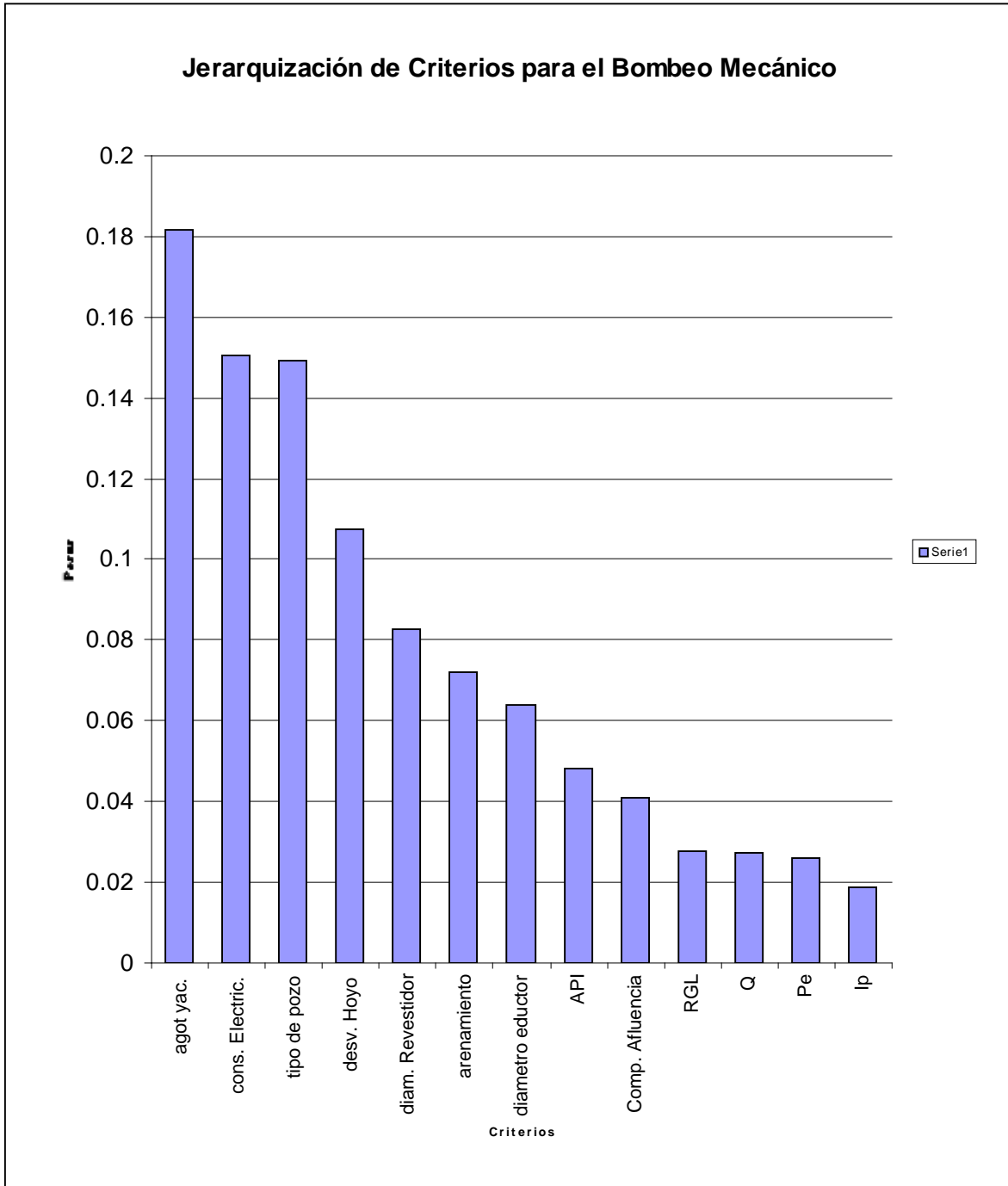
A partir de la matriz de comparación (Apéndice I) y siguiendo la fase III y IV de la metodología de Generación de Criterios aplicada a la realidad del Campo Cerro Negro, se determinaron, previa consulta a la muestra los pesos de los criterios, originando así su correspondiente nivel de importancia o jerarquización, determinándose para el Bombeo Mecánico los resultados que se muestran en la Tabla # 5.1.4

Criterio	Peso Especifico
Agotamiento del yac.	0,18157113
Consumo eléctrico	0,15072531
Tipo de Pozo	0,14926958
Desv. De Hoyo	0,1076597
Diámetro del Rev.	0,08263104
Arenamiento	0,07206203
Diámetro del Eductor	0,06410
API	0,04825682
comp. Afluencia	0,0410885
RGL	0,02756518
Q	0,02716902
Pe	0,02616117
Ip	0,01862609

Tabla Nro 5.1.4

En la tabla Nro 5.1.5 se muestra cada criterio a la derecha con su peso ponderado a la izquierda y su jerarquización de acuerdo a su importancia en orden ascendente, siendo los principales para el campo Cerro Negro en cuanto a Bombeo Mecánico: el agotamiento del Yacimiento, el consumo eléctrico y el Tipo de Pozo, seguidos en orden decreciente por la desviación del Hoyo, el Diámetro del Revestidor, el arenamiento, el Diámetro del Eductor, la Gravedad API, el Comportamiento de Afluencia, la RGL, la tasa de Líquido, la Presión estática y finalmente el Índice de Productividad.

A continuación se observa en la gráfica # 3.1.1 la jerarquización de los criterios de una manera más evidente en cuanto al Bombeo Mecánico:



Fuente: Elaboración Propia

FIG. 3.1.1

Criterio	Peso Especifico
Corrosión	0,1211309639
Diam Revestidor	0,108433608
Desviación Pozo	0,09596608
Viscosidad	0,81061702
Corte de Agua	0,08722993
Temperatura	0,078486319
Diam. Del Eductor	0,074888229
Comportamiento Afl.	0,06253579
Avenamiento	0,058949853
API	0,057047646
RGL	0,03953757
Q	0,037556186
Pe	0,032697827
IP	0,028150063
Comportamiento fluidos-elastómero	0,021535231
Prod. Sólidos	0,021121264

Tabla 5.1.5

En la tabla Nro. 5.1.5 se muestra cada criterio a la derecha con su peso ponderado a la izquierda y su jerarquización de acuerdo a su importancia en orden ascendente, siendo los principales en la Selección del Sistema de Bombeo de Cavidades Progresivas para el campo Cerro Negro los más importantes la Corrosión, el Diámetro del Revestidor y la Desviación del Hoyo, seguidos en orden de importancia por la Viscosidad, el Corte de Agua, la temperatura, el Diámetro del Eductor, El Comportamiento de Afluencia, el Arenamiento, la Gravedad API, la Relación Gas-Petróleo, la Tasa de Producción, la presión Estática, el Índice de Productividad, el comportamiento de los fluidos- elastómero y finalmente la Producción de Sólidos respectivamente, en ese orden de jerarquía.

A continuación se observa en la figura 1.3.2 la jerarquización de los criterios de una manera más evidente en cuanto al Bombeo de Cavidades Progresivas:

Jerarquización de Criterios para la Bomba de Cavity Progresiva

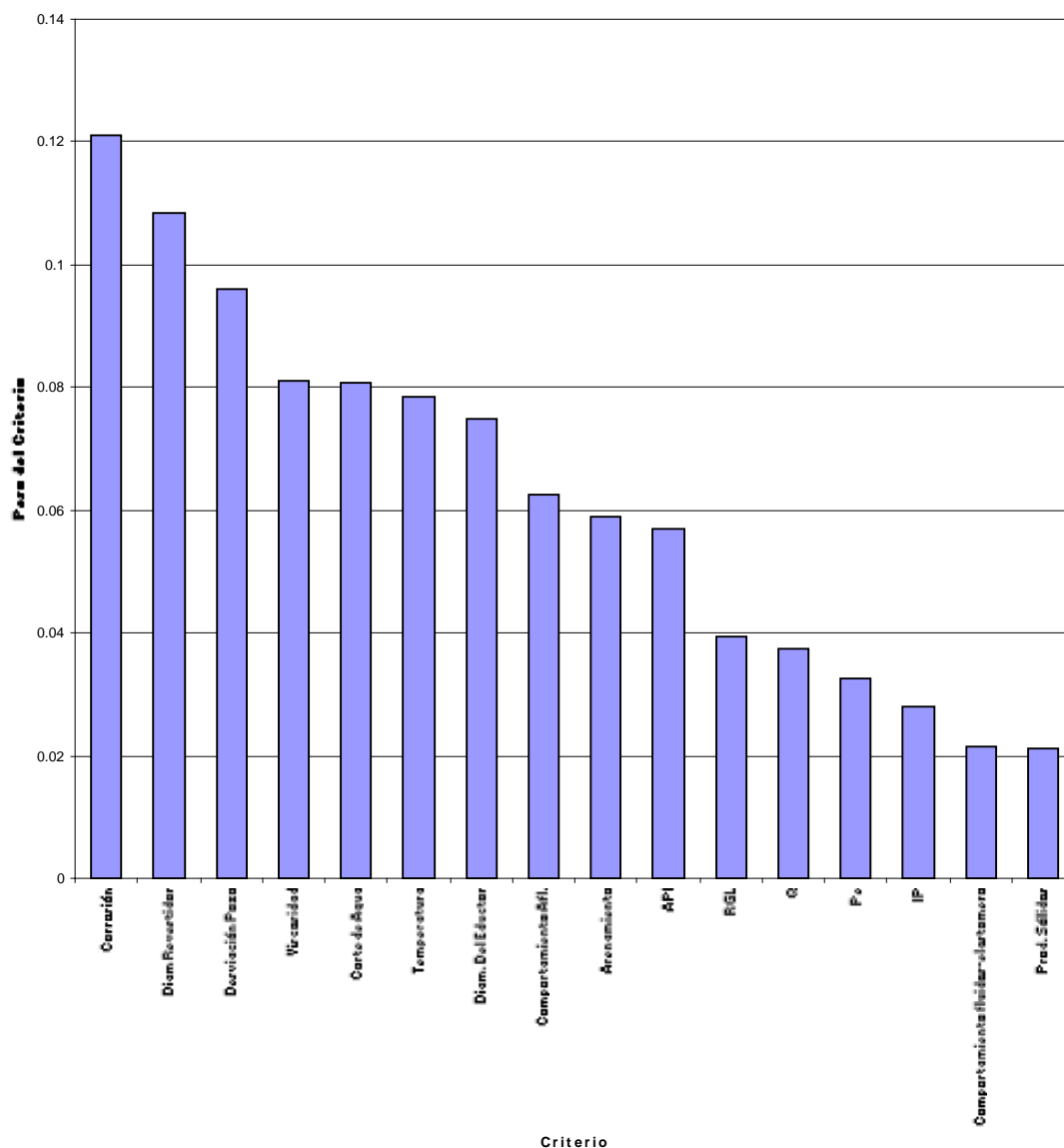


Figura 3.1.2

Fuente: Elaboración Propia

Criterio	Peso Especifico
Mecanismo Prod.	0,15751971
Diámetro del revestidor	0,0941788
Desviación de Hoyo	0,09155086
Consumo Eléctrico	0.09152639
Viscosidad de Crudo	0,08344017
Diámetro del Eductor	0,07545008
Temperatura	0,06927571
Comp.. Afluencia	0,06551314
Arenamiento	0,056856
Pe	0,05564337
API	0,052716
Q	0,02957099
RGL	0,02922277
Corte de Agua	0,02707369
Ip	0,01675075

Tabla 5.1.6

En la tabla 5.1.6 se muestra cada criterio a la derecha con su peso ponderado a la izquierda y su jerarquización de acuerdo a su importancia en orden ascendente, siendo los principales que afectan la selección del Bombeo Electrosumergible para el campo Cerro Negro los más importantes: el Mecanismo de Producción, el Diámetro del Revestidor, la Desviación del Hoyo, el consumo eléctrico, la Viscosidad del Crudo; seguidos del Diámetro del Eductor, la Temperatura, el Comportamiento de Afluencia, el Arenamiento, la Presión Estática, la Gravedad API, la Tasa de Producción, la Relación Gas Líquido, el Corte de Agua y finalmente el Índice de Productividad, respectivamente.

A continuación se observa en la ilustración#3.1.3 la jerarquización de los criterios de una manera más evidente en cuanto al Bombes Electrosomergibles:

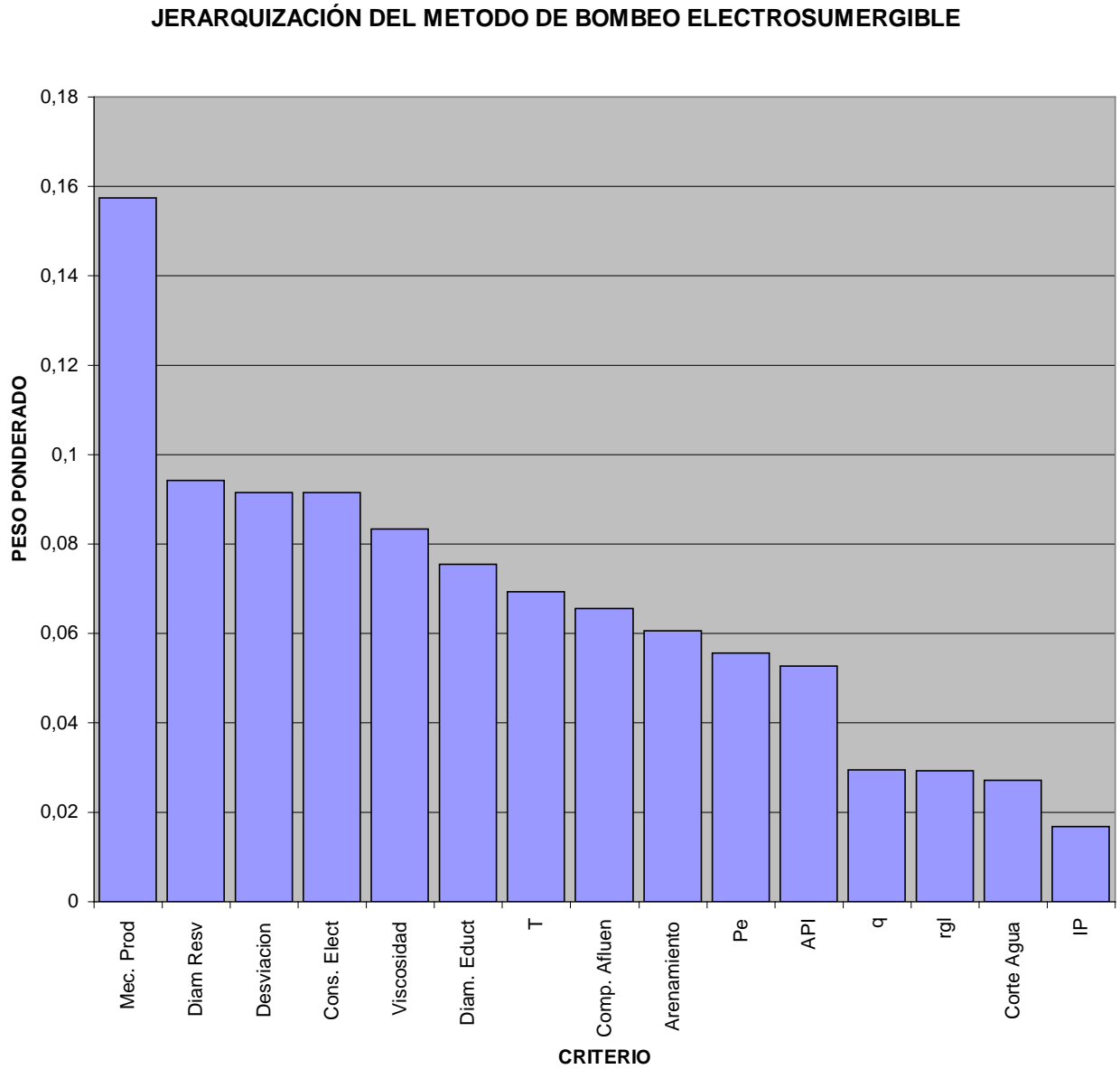
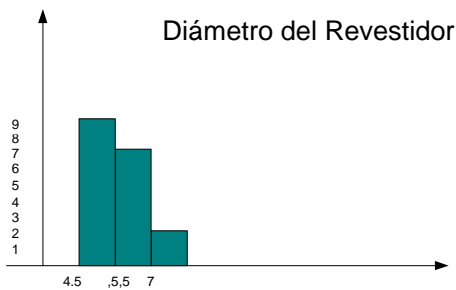
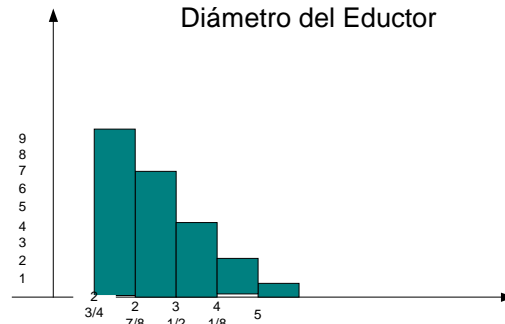
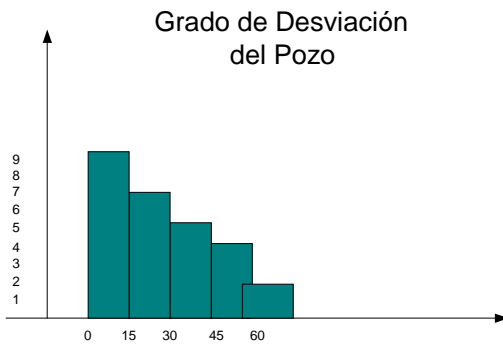
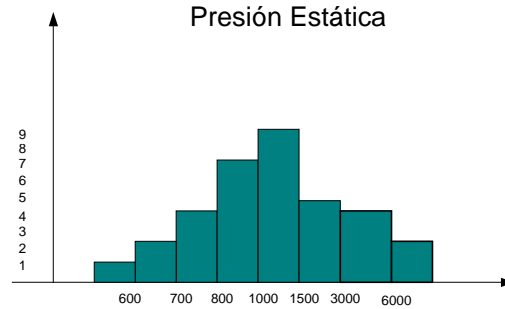
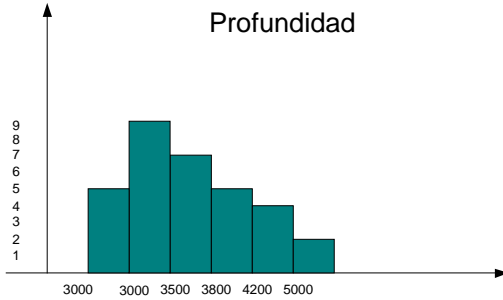
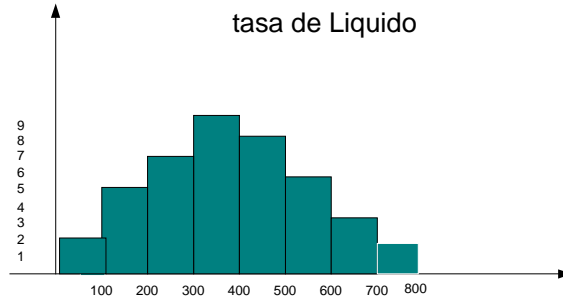
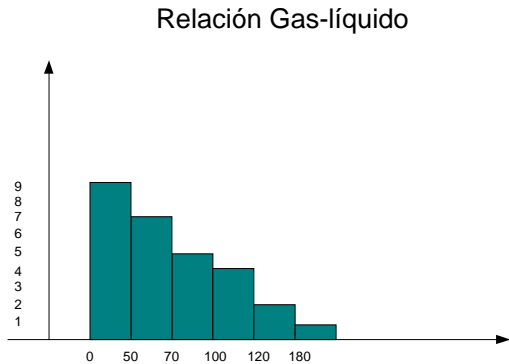
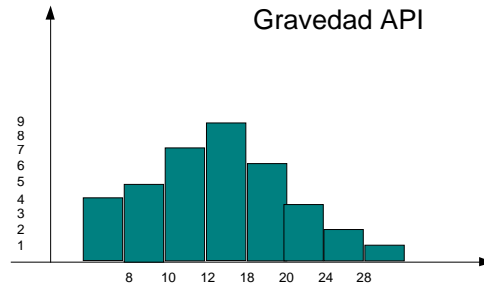
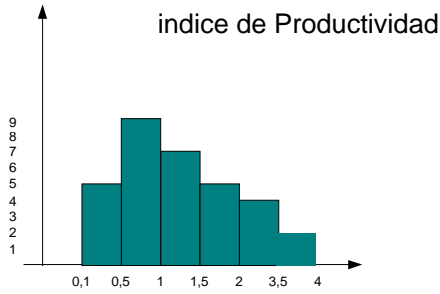


figura 3.1.3

Fuente: Elaboración Propia

Finalmente se generaron las Curvas de Valoración obtenidas del tercer cuestionario realizado por los expertos ilustraciones (3.1.4, 3.1.5 y 3.1.6) correspondientes a las preferencias de los sistemas de Levantamiento Artificial en el Campo Cerro Negro, como consecuencia de los diferentes criterios generados y jerarquizados en la anterior fase, teniendo en cuenta que, privaron variables de tipo económico como el tiempo de Vida Útil y el Costo de Operación, considerados por los expertos entrevistados variables o criterios de singular importancia en la preferencia de un sistema respecto a otro, lo que le da una dimensión más completa a la selección de estos, cuando se someten a una comparación para una posterior elección.

En relación a la consistencia de los datos emitidos por los expertos se presentaron en las tablas 5.1.4, 5.1.5 y 5.1.6 que precisan coherencia, ya que al obtenerse valores muy significativos por debajo de 0,1, para lo cual los datos emitidos demuestran consistencia en los juicios emitidos por los expertos.



3.1.4. Curvas de Valoración para Bombeo Mecánico

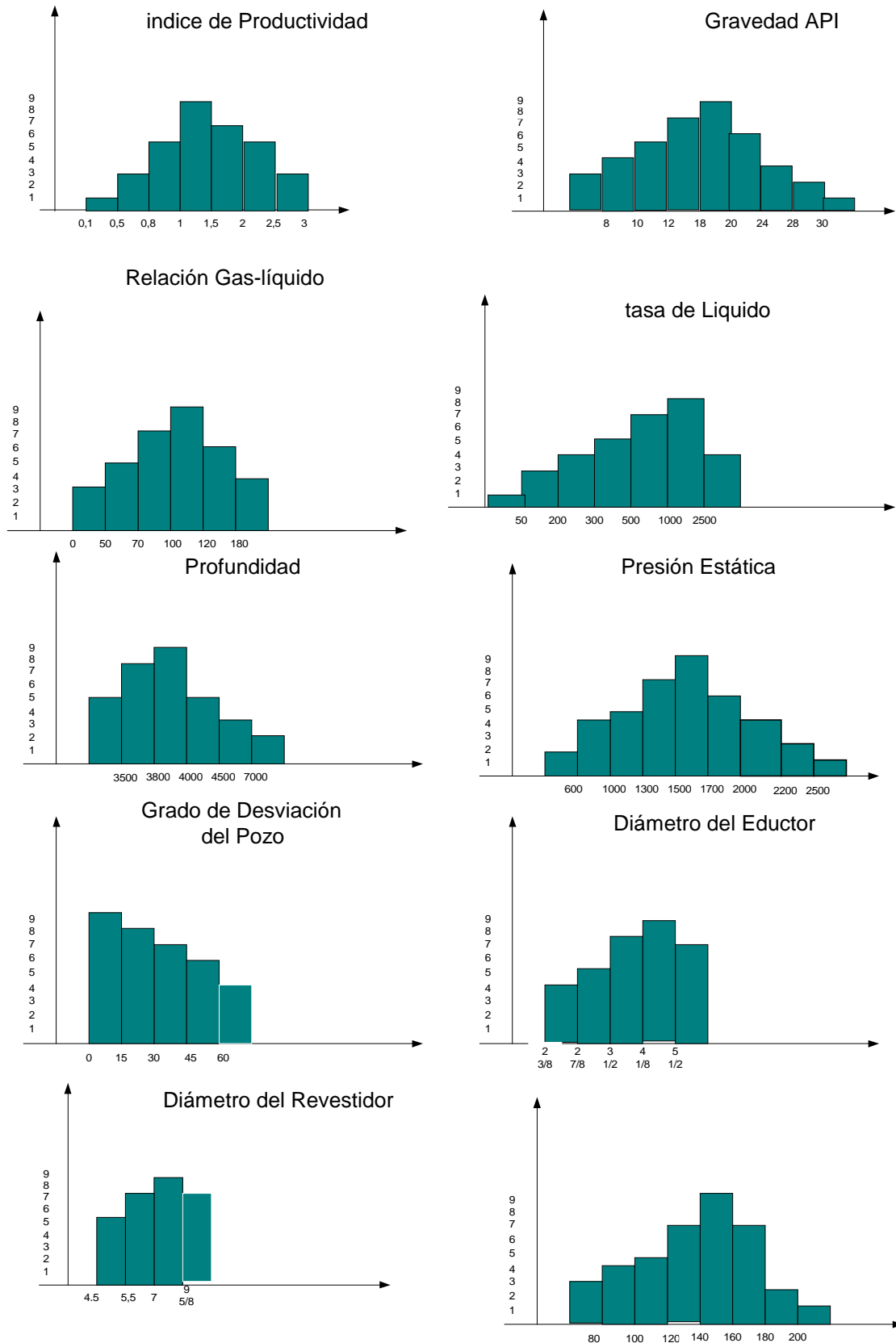


Ilustración 3.1.5. Curvas de Valoración. Bombeo de Cavidad Progressiva

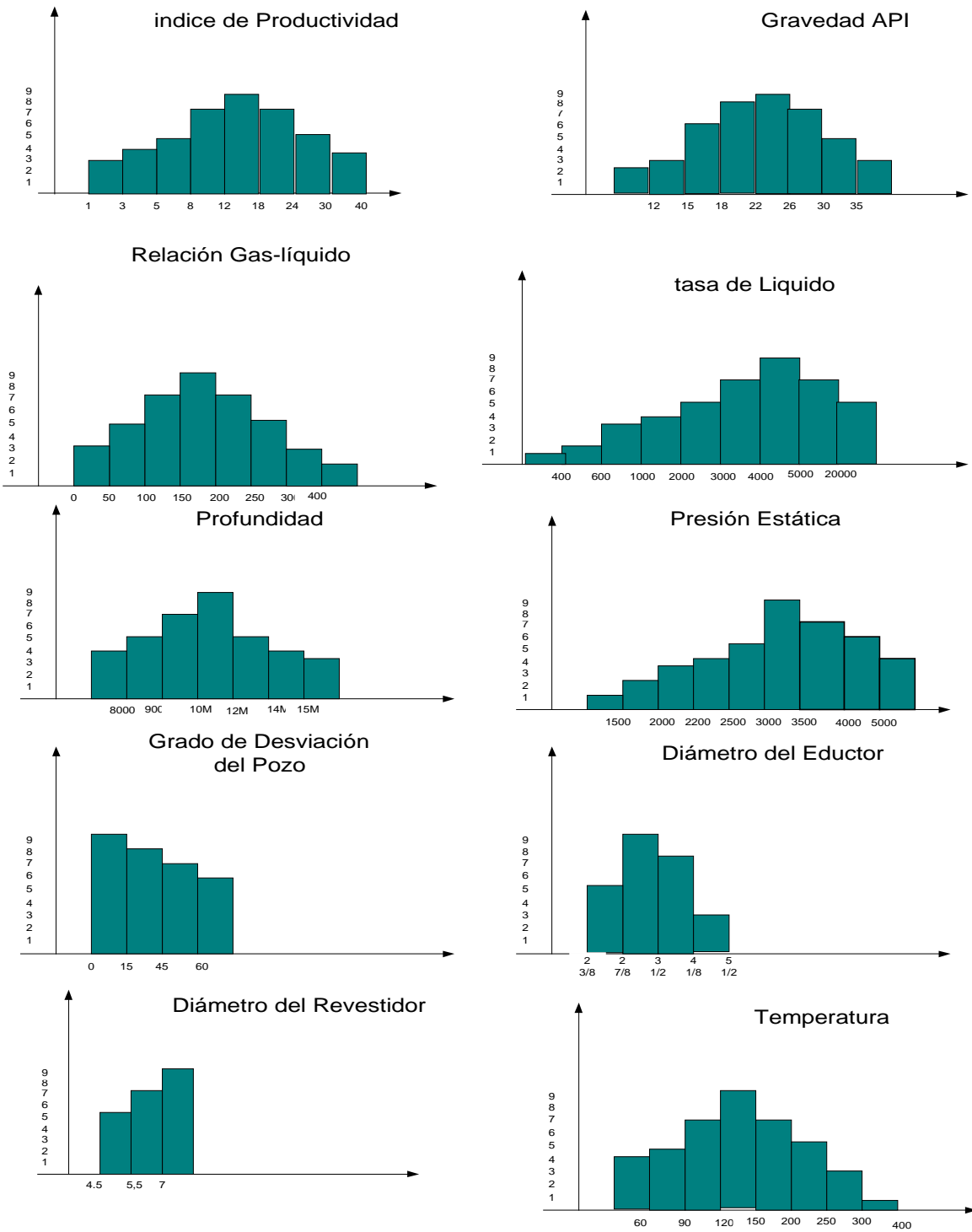


Ilustración 3.1.6. Curvas de Valoración para Bombeo Electrosumergible

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

■ La metodología evaluada permite de una manera sencilla, rápida y objetiva la adaptación a la realidad del campo Cerro Negro la aplicación de nuevas tecnologías, con un mínimo de impacto ambiental, una alta rentabilidad y con un mínimo costo en la Selección de Sistemas de Levantamiento Artificial para cualquier pozo o yacimiento,

■ La metodología de Diseño de una familia coherente de criterios presenta una forma sistematizada la integración del conocimiento en el área de Investigación de Operaciones para la toma de Decisiones con discernimiento actualizado en Ingeniería de Producción adaptable al Campo Cerro Negro.

■ La metodología aplicada permite evaluar objetivamente los criterios que privan en la selección de sistemas de levantamiento en el campo Cerro Negro, mediante la integración de la teoría generalizada acerca de las fortalezas y debilidades cada sistema y la experiencia en cuanto a estos a través del tiempo del equipo de expertos consultados.

■ Las curvas de Valoración obtenidas en este estudio, sirven de referencia fidedigna para expresar las preferencias en intervalos determinados de los criterios que privan para la Selección de Sistema en el campo Cerro Negro.

■ La incorporación de criterios de tipo económico de forma implícita en la matriz, permitió tomar en cuenta variables de considerable importancia a la hora de seleccionar Sistemas de levantamiento artificial, lo que hace de esta metodología más flexible reconociendo el peso que tienen las variables económicas en la selección de los Sistemas de Levantamiento.

■ Los resultados alcanzados en este estudio permiten conformar una base sólida para la búsqueda de alternativas que permitan apoyar decisiones en Investigación de Operaciones en el área de Producción.

■ El carácter subjetivo de los juicios emitidos por la unidad de decisión infiere que la principal debilidad de la metodología radica en la disposición de la unidad de decisión al emitir los juicios, por lo tanto es necesaria la comprensión de la metodología por parte de esta y la sinceridad y disposición a esta a emitirlos.



RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

- Extender la consulta a por lo menos cinco (5) expertos para afinar más los resultados generados, con el fin de ampliar la confiabilidad y validez que permite su uso óptimo en el Campo Cerro Negro.

- Incorporar criterios derivados de las innovaciones tecnológicas ofrecidas por los tres sistemas para adecuar mucho más objetivamente la metodología.

- Realizar una campaña de masificación de dicha metodología para crear conciencia acerca de la importancia de este tipo de estudio en la Selección de Sistemas de Levantamiento Artificial.

- Invitar a especialistas que manifiesten interés, disposición y tiempo, debido a que la principal dificultad encontrada en el desarrollo de la misma son estos tres factores.

- Evaluar en el mismo campo este tipo de estudio pero para el otro tipo de crudos, incorporando criterios y sistemas apropiados para tal fin, para tener una referencia completa de la metodología aplicable al campo Cerro Negro.

- Complementar lo sugerido anteriormente con la elaboración de un software que permita la optimización del tiempo de procesamiento de los datos, y una manera más fácil y amena para generarlos.

- Hacer extensivo el uso de la Metodología Coherente de Generación de la Familia Coherente de Criterios y de los resultados para los otros bloques que operan en la Faja Petrolífera del Orinoco con campos con características similares al Campo Cerro Negro.

- Efectuar una prueba piloto con data actualizada, ya que por problemas de otra índole fue imposible cumplir con este objetivo



**REFERENCIAS
BIBLIOGRAFICAS**

BIBLIOGRAFIA

- (1) SOLÍS, M. G. (1979) **Selecting the Optimum Artificial Production System for an oil Field**. Mexican Petroleum Institute Magazine V. Nro. 2. pp 38/48. April 1979. Exploration Technology Subdivision Mexican Petroleum Institute.
- (2) BROWN KERMIT. **The Tecnology for Artificial Gas Lift**. Petroleum Publishing. Co. Tulsa. 1980.
- (3) ESCALONA T, Víctor. **Modelos de Selección de Sistemas de Levantamiento Artificial Aplicados a Pozos y/o Yacimientos**. Octubre 1992. Trabajo de Ascenso a profesor asociado. UCV. Ingeniería de Petróleo.
- (4) CLEGG, BUCARAM AND HEIN, SPE 24834, **Recommendation and comparison s for selecting Artificial-lift Methods**. The SPE Image Library . Octubre 1993
- (5) ESCALONA T, Víctor. Informe de Progreso Nro 2. Octubre 1997. BITOR.
- (6) REYES, YAMILA. **Optimización del Sistema Experto de Levantamiento Artificial**, Trabajo Especial de Grado para Optar al Título de Ingeniero de Petróleo. Mayo. 1999. Pág. 59-76.
- (7) GIUSTI, Gustavo. “**Análisis, Evaluación y Selección de los Factores que Afectan la Escogencia de Levantamiento en Áreas tradicionales de Cerro Negro y Morichal**”, Trabajo Especial de Grado, UCV, Caracas, Mayo 1999. Pág. 139-142
- (8) SILVA CORTEZ, LUIS. **Programa para la Selección de un Sistema de Levantamiento Artificial**. Trabajo Especial de Grado, UCV, Caracas, Mayo 1999. Págs. 7-12.
- (9) CARRILLO JESÚS, **Diseño de una Familia Coherente de Criterios para la Selección de Sistemas de Levantamiento Artificial**. Trabajo Especial de Grado, UCV, Caracas, Mayo 2001. Pág. 6-38, 92-107.

(10) Escalona T, Víctor. Análisis y Evaluación de Factores que inciden en Sistemas de Levantamiento Artificial, Julio 2002, no publicado

(11) BARBERII, Efraín. El Pozo Ilustrado. Quinta Edición. Ediciones Fonciéd. Caracas, Mayo 2001. Págs. 534-538.

(*) GUARDIOLA, María (1996) Revisión del Bombeo Electrosumergible en el Campo Cerro Negro. Trabajo Especial de Grado, UDO, Pto. La Cruz. Pág. 5-49

(12) GARCIA Armando, Evolución Histórica del Petróleo en Venezuela. Trabajo Especial de Grado. Facultad de Humanidades. U.C.V, Pág. 29

(13) IBÁÑEZ, Berenice. La Tesis Universitaria. Editorial Limux. México, 1980,

(14) TAMAYO Y TAMAYO, Mario. El Proceso de la investigación Científica. Fundamentos de la Investigación con Manual de Evaluación de Proyectos. Noriega Editores Segunda Edición. Editorial Limusa. México 1987. págs. 33, 91, 92 y 98.

(15) SABINO, Carlos. El Proceso de La Investigación Científica. El Cid Editor. Argentina. 1992. Págs. 89, 90 y 130.

(16) BALESTRINI ACUÑA, Miriam. Como se elabora un proyecto de Investigación; Servicio de Consultores Asociados, Caracas, 1997. Pág.14

(17) VALBUENA, Antonio. Evaluación en el Proceso de Enseñanza-aprendizaje. Editorial Cobo. 1983. Págs.37-45.

(18) SCHLUMBERGER, WEC. **Geología de los Campos Venezolanos**, Caracas, 1997.

**APÉNDICE I
CUESTIONARIOS
REALIZADOS**

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEO

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO: Evaluación de los mecanismos de producción petrolera en el área de Cerro Negro, Faja Bituminosa del Orinoco	
Tipo de investigación: De campo.	Coordinador: Cipriano Antonio Solórzano.
Metodología: Metodología de Selección de Criterios.	Unidad de decisión: Expertos en el Área de producción.
Nombre del Experto:	Área donde se desempeña en la industria:
Instrumento: Entrevista.	Herramienta: Cuestionario de preguntas.
A continuación se le presentan una serie de preguntas cerradas con final abierto, para que usted las conteste de tal manera que pueda responder con la libertad de pensamiento que Usted considere	

¿De los siguientes criterios propuestos: Qué criterios considera más importantes usted en base a su reconocida experiencia que influyen en la selección del sistema de Bombeo mecánico en el área del oriente del país, específicamente en el área de producción de crudos pesados y extrapesados?

- | | | | |
|-------------------------|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| Índice de Productividad | <input type="checkbox"/> | Diámetro del Revestidor | <input type="checkbox"/> |
| Tasa de Líquido | <input type="checkbox"/> | Diámetro del Eductor | <input type="checkbox"/> |
| Relación Gas-líquido | <input type="checkbox"/> | Comportamiento de Afluencia | <input type="checkbox"/> |
| Profundidad | <input type="checkbox"/> | Diámetro del Hoyo | <input type="checkbox"/> |
| Presión Estática | <input type="checkbox"/> | Producción de Parafinas y Asfáltenos | <input type="checkbox"/> |
| Gravedad API | <input type="checkbox"/> | Acumulación de Escamas | <input type="checkbox"/> |
| Problemas de Corrosión | <input type="checkbox"/> | Arenamiento del Pozo | <input type="checkbox"/> |
| Corte de Agua | <input type="checkbox"/> | | |

Otros (Especifique) :

- Ø _____
- Ø _____
- Ø _____
- Ø _____

2.¿De los siguientes criterios propuestos: Qué criterios considera más importantes usted en base a su reconocida experiencia que influyen en la selección del sistema de Bombeo de Cavidades Progresivas en el área del oriente del país, específicamente en el área de producción de crudos pesados y extrapesados?

Índice de Productividad	<input type="checkbox"/>	Diámetro del Revestidor	<input type="checkbox"/>
Tasa de Líquido	<input type="checkbox"/>	Diámetro del Eductor	<input type="checkbox"/>
Relación Gas-líquido	<input type="checkbox"/>	Comportamiento de Afluencia	<input type="checkbox"/>
Profundidad	<input type="checkbox"/>	Temperatura	<input type="checkbox"/>
Presión Estática	<input type="checkbox"/>	Producción de Parafinas y Asfáltenos	<input type="checkbox"/>
Gravedad API	<input type="checkbox"/>	Acumulación de Escamas	<input type="checkbox"/>
Fuentes de Energía	<input type="checkbox"/>	Arenamiento del Pozo	<input type="checkbox"/>
Plataforma de Producción	<input type="checkbox"/>	Desviación del Hoyo	<input type="checkbox"/>
Corte de Agua	<input type="checkbox"/>		

Otros (Especifique):

Ø _____

Ø _____

Ø _____

Ø _____

3. ¿De los siguientes criterios propuestos: Qué criterios considera más importantes usted en base a su reconocida experiencia que influyen en la selección del sistema de Bombeo Electrosumergible en el área del oriente del país, específicamente en el área de producción de crudos pesados y extrapesados?

Índice de Productividad	<input type="checkbox"/>	Diámetro del Revestidor	<input type="checkbox"/>
Tasa de Líquido	<input type="checkbox"/>	Diámetro del Eductor	<input type="checkbox"/>
Relación Gas-líquido	<input type="checkbox"/>	Comportamiento de Afluencia	<input type="checkbox"/>
Profundidad	<input type="checkbox"/>	Acumulación de Escamas	<input type="checkbox"/>
Presión Estática	<input type="checkbox"/>	Producción de Parafinas y Asfáltenos	<input type="checkbox"/>
Gravedad API	<input type="checkbox"/>	Desviación del Hoyo	<input type="checkbox"/>
Temperatura	<input type="checkbox"/>	Arenamiento del pozo	<input type="checkbox"/>
Corte de Agua	<input type="checkbox"/>	Fuentes de Energía	<input type="checkbox"/>
Plataforma de Producción	<input type="checkbox"/>	Mecanismos de Producción	<input type="checkbox"/>
Problemas de Corrosión	<input type="checkbox"/>		

Otros (Especifique):

Ø _____

Ø _____

Ø _____

Ø _____

5 ¿Según las experiencias del Sistema en la zona del Oriente, cuales son las fortalezas que presenta el sistema de Bombeo Mecánico en el área del Oriente del país?

6 ¿Según las experiencias del Sistema en la zona del Oriente, cuales son las fortalezas que presenta el sistema de Bombeo de Cavidad Progresiva en el área del Oriente del país?

7 ¿Según las experiencias del Sistema en la zona del Oriente, cuales son las fortalezas que presenta el sistema de Bombeo electrosumergible en el área del Oriente del país?

**UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEO**

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO: Evaluación de los mecanismos de producción petrolera en el área de Cerro Negro, Faja Bituminosa del Orinoco	
Tipo de investigación: De campo.	Coordinador: Cipriano Antonio Solórzano.
Metodología: Metodología de Selección de Criterios.	Unidad de decisión: Expertos en el Área de producción.
Nombre del Experto:	Área donde se desempeña en la industria:
Instrumento: Entrevista.	Herramienta: Cuestionario de preguntas.

CUESTIONARIO PARA DETERMINACIÓN DE LOS PESOS DE LOS CRITERIOS

A continuación se le presenta una escala de valoración (Saaty) en la cual usted le asignará en base a su experiencia en el área de Sistemas de Levantamiento Artificial.

Valor	Interpretación
1	Los criterios de i y j (matriz) tienen igual importancia.
3	El criterio i es ligeramente más importante que el criterio J
5	La experiencia y la apreciación indican que el criterio i es mucho más importante que el criterio j
7	El criterio i es muy importante, o se puede demostrar que es más importante que el criterio j
9	El criterio i es absolutamente más importante que el criterio j
2,4,6,8	Valores intermedios, indican que el criterio en estudio está en término medio entre las categorías vecinas

Método a evaluar en el oriente del país: **Bombeo mecánico**

De acuerdo a la tabla de valoración realice la comparación entre los pares de criterios que se muestran en la matriz

J \ I	Índice de productividad	Tasa de líquido	Relación Gas-líquido	Gravedad API	Arenamiento del pozo	Diámetro del revestidor	Diámetro del Eductor	Diámetro de Hoyo	Comportamiento de Afluencia	Tipo de pozo	Consumo Eléctrico	Presión Estática	Estado de agotamiento del Yacimiento
Índice de productividad	1												
Tasa de líquido		1											
Relación gas-líquido			1										
Gravedad API				1									
Arenamiento del pozo					1								
Diámetro del revestidor						1							
Diámetro del eductor							1						
Diámetro del hoyo								1					
Comportamiento de afluencia									1				
Tipo de Pozo										1			
Consumo Eléctrico											1		
Presión Estática												1	
Estado de Agotamiento del Yacimiento													1

Método a Evaluar: Bomba de Cavidad Progressiva

De acuerdo a la tabla de valoración realice la comparación entre los pares de criterios que se muestran en la matriz

J \ I	Índice de productividad	Tasa de Líquido	Relación Gas-líquido	Presión Estática	Gravedad API	Corte de Agua	Viscosidad del Fluido	Producción de Sólidos (Finos)	Compatibilidad elastómeros con fluidos el	diámetro del Revestidor	Diámetro del Eductor	Comportamiento de Afluencia	Temperatura	Arenamiento del Pozo	Desviación del Pozo	Problemas de corrosión
Índice de Productividad	1															
Tasa de Líquido		1														
Relación Gas-líquido			1													
Presión Estática				1												
Gravedad API					1											
Corte de Agua						1										
Viscosidad del Fluido							1									
Producción de Sólidos (finos)								1								
Compatibilidad de elastómeros con fluidos									1							
Diámetro del revestidor										1						
Diámetro del eductor											1					
Comportamiento de Afluencia												1				
Temperatura													1			
Avenamiento del Pozo														1		
Desviación del Hoyo															1	
Problemas de Corrosión																1

Método a Evaluar: **Bombeo Electrosumergible**

De acuerdo a la tabla de valoración realice la comparación entre los pares de criterios que se muestran en la matriz

I \ J	Índice de productividad	Tasa de Líquido	Relación Gas-Líquido	Presión Estática	Gravedad API	Temperatura	Corte de Agua	Consumo Eléctrico	Viscosidad del Fluido (Diluentes)	Diámetro del Revestidor	Diámetro del Eductor	Comportamiento de Afluencia	desviación de Hoyo	Avenamiento del Pozo	Mecanismos de Producción
Índice de Productividad	1														
Tasa de Líquido		1													
Relación Gas-líquido			1												
Presión Estática				1											
Gravedad API					1										
Temperatura						1									
Corte de Agua							1								
Consumo Eléctrico								1							
Viscosidad de Fluidos(Diluentes)									1						
Diámetro del Revestidor										1					
Diámetro del Eductor											1				
Comportamiento de afluencia												1			
Desviación de Hoyo													1		
Avenamiento del Pozo														1	
Mecanismos de Producción															1

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEO

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO: Evaluación de los mecanismos de producción petrolera en el área de Cerro Negro, Faja Bituminosa del Orinoco	
Tipo de investigación: De campo.	Coordinador: Cipriano Antonio Solórzano.
Metodología: Metodología de Selección de Criterios.	Unidad de decisión: Expertos en el Área de producción.
Nombre del Experto:	Área donde se desempeña en la industria:
Instrumento: Entrevista.	Herramienta: Cuestionario.

CUESTIONARIO PARA DETERMINAR LA FUNCIÓN ESCALÓN PARA LAS CURVAS DE VALORACIÓN

VALOR	SIMILITUD	SIGNIFICADO
9	Excelente	El intervalo ideal y el intervalo a calificar difieren en algo, por lo que su grado de similitud es el más elevado posible.
7	Muy buena	El intervalo ideal y del intervalo a calificar son semejantes, pero se perciben algunas diferencias, por lo que su grado de similitud es alto.
5	Buena	Entre el intervalo ideal y el intervalo a calificar se percibe tantas razones de semejanza como diferencia por lo que su grado de similitud es medio.
3	Regular	El intervalo ideal y el intervalo a calificar son distintos pero también perciben algunas semejanzas, por lo que su grado de similitud es bajo.
1	Mala	El intervalo ideal y el intervalo a calificar no se parecen, por lo que su grado de similitud es lo más bajo posible.
2,4,6,8	Grado intermedio entre valores adyacentes	Estos valores se utilizan cuando se requiere un compromiso entre las situaciones descritas para valores adyacentes en la escala.

Cual considera usted, que es en que el criterio se comporta de manera ideal, para el método en cuestión e indique en la casilla correspondiente el valor del grado de similitud entre el intervalo ideal y el intervalo a calificar según la escala

Método a evaluar: **Bombeo Mecánico**

Índice de productividad	Intervalo ideal	
F(IP)	$0,1 \leq IP < 0,5$	
	$0,5 \leq IP < 1$	
	$1 \leq IP < 1,5$	
	$1,5 \leq IP < 2$	
	$2,0 \leq IP < 2,5$	
	$2,5 \leq IP < 3,0$	
	$3,0 \leq IP < 3,5$	
	$IP > 0,5$	

Tasa de Liquido	Intervalo ideal	
F(q)	$q < 100$	
	$100 \leq q < 200$	
	$200 \leq q < 300$	
	$300 \leq q < 400$	
	$400 \leq q < 500$	
	$500 \leq q < 600$	
	$600 \leq q < 700$	
	$700 \leq q < 800$	
	$q > 800$	

Relación gas-liquido	Intervalo ideal	
F(RGL)	$0 \leq RGL < 50$	
	$50 \leq RGL < 70$	
	$70 \leq RGL < 100$	
	$100 \leq RGL < 120$	
	$120 \leq RGL < 150$	
	$150 \leq RGL < 180$	
	$RGL > 180$	

Presión Estática en el Yacimiento	Intervalo ideal	
	$Pe < 500$	
	$500 \leq Pe < 600$	
	$600 \leq IP < 700$	
	$700 \leq IP < 800$	
	$800 \leq IP < 1000$	
	$1000 \leq IP < 1500$	
	$1500 \leq IP < 3000$	
	$3000 \leq IP < 6000$	
	$Pe > 6000$	

Gravedad API	Intervalo ideal	
F(API)	API < 8	
	$8 \leq API < 10$	
	$10 \leq API < 12$	
	$12 \leq API < 14$	
	$16 \leq API < 20$	
	$20 \leq IP < 24$	
	$24 \leq API < 28$	
	API > 28	

Diámetro del tubería (revestidor)	Intervalo ideal	
F(DR)	$4,5 \leq DR < 5,5$	
	$5,5 \leq DR < 7$	
	DR > 7	

Diámetro de tubería (Eductor)	Intervalo ideal	
F(DE)	$2^{3/8} \leq DE < 2^{7/8}$	
	$2^{7/8} \leq DE < 3^{1/2}$	
	$3^{1/2} \leq DE < 4^{1/2}$	
	$4^{1/2} \leq DE < 5^{1/2}$	
	DE > 5 ^{1/2}	

Método a Evaluar: Bombeo Electrosumergible.

Cual considera usted, que es en que el criterio se comporta de manera ideal, para el método en cuestión e indique en la casilla correspondiente el valor del grado de similitud entre el intervalo ideal y el intervalo a calificar según la escala

Índice de productividad	Intervalo ideal	
F(IP)	$1 \leq IP < 3$	
	$3 \leq IP < 5$	
	$5 \leq IP < 8$	
	$8 \leq IP < 12$	
	$12 \leq IP < 18$	
	$24 \leq IP < 30$	
	$30 \leq IP < 40$	
	$IP > 40$	

Tasa de Liquido	Intervalo ideal	
F(q)	$q < 300$	
	$300 \leq q < 400$	
	$400 \leq q < 600$	
	$600 \leq q < 1000$	
	$1000 \leq q < 2000$	
	$2000 \leq q < 3000$	
	$3000 \leq q < 4000$	
	$4000 \leq q < 5000$	
	$5000 \leq q < 20000$	
$q > 20000$		

Relación gas-liquido	Intervalo ideal	
F(RGL)	$0 \leq RGL < 50$	
	$50 \leq RGL < 100$	
	$100 \leq RGL < 150$	
	$150 \leq RGL < 200$	
	$200 \leq RGL < 250$	
	$250 \leq RGL < 300$	
	$300 \leq RGL < 400$	
	$RGL > 400$	

Profundidad al tope de la perf	Intervalo ideal	
	$D < 8000$	
	$8000 \leq IP < 9000$	
	$9000 \leq IP < 10000$	
	$10000 \leq IP < 12000$	
	$12000 \leq IP < 14000$	
	$14000 \leq IP < 15000$	
	$D > 15000$	

Presión Estática en el Yacimiento	Intervalo ideal	
	Pe<1500	
	1500≤Pe<2000	
	2000≤pe<2200	
	2200≤pe<2500	
	2500≤pe<3000	
	3000≤pe<3500	
	3500≤pe<4000	
	4000≤Pe<5000	
	Pe>5000	

Gravedad API	Intervalo ideal	
F(API)	API<12	
	12≤API<15	
	15≤API<18	
	18≤API<22	
	22≤API<26	
	26≤IP<30	
	30≤API <35	
	API>35	

Temperatura al tope de la formación	Intervalo ideal	
F(T)	60≤Gra<90	
	90≤GraI<120	
	120≤GraI<150	
	150≤Gra<160	
	150≤Gra<160	
	160≤Gra<170	
	170≤Gra<180	
	200≤Gra<250	
	250≤Gra<300	

Grado de desviación del pozo	Intervalo ideal	
F(GRA)	0≤Gra<15	
	15≤GraI<30	
	30≤GraI<45	
	45≤Gra<60	
	GraI>60	

Diámetro de tubería (Eductor)	Intervalo ideal	
F(DE)	$2^{3/8} \leq DE < 2^{7/8}$	
	$2^{7/8} \leq DE < 3^{1/2}$	
	$3^{1/2} \leq DE < 4^{1/2}$	
	$4^{1/2} \leq DE < 5^{1/2}$	
	DE>5 ^{1/2}	

Diámetro de tubería (Revestidor)	Intervalo ideal	
F(DR)	4,5≤DR<5,5	
	5,5≤DR<7	
	DR>7	

Método a Evaluar: Bombeo de Cavidad Progresiva.

Cual considera usted, que es en que el criterio se comporta de manera ideal, para el método en cuestión e indique en la casilla correspondiente el valor del grado de similitud entre el intervalo ideal y el intervalo a calificar según la escala

Índice de productividad	Intervalo ideal	
F(IP)	$0,1 \leq IP < 0,5$	
	$0,5 \leq IP < 0,8$	
	$0,8 \leq IP < 1$	
	$1 \leq IP < 1,5$	
	$1,5 \leq IP < 2,0$	
	$2,0 \leq IP < 2,5$	
	$2,5 \leq IP < 3,0$	
	$IP > 3,0$	

Tasa de Liquido	Intervalo ideal	
F(q)	$q < 30$	
	$30 \leq q < 50$	
	$50 \leq q < 80$	
	$80 \leq q < 100$	
	$100 \leq q < 200$	
	$200 \leq q < 300$	
	$300 \leq q < 500$	
	$500 \leq q < 1000$	
	$1000 \leq q < 2500$	
$q > 2500$		

Relación gas-liquido	Intervalo ideal	
F(RGL)	$0 \leq RGL < 50$	
	$50 \leq RGL < 60$	
	$60 \leq RGL < 70$	
	$70 \leq RGL < 100$	
	$100 \leq RGL < 120$	
	$120 \leq RGL < 180$	
	$180 \leq RGL < 200$	

Presión Estática en el Yacimiento	Intervalo ideal	
	$Pe < 600$	
	$600 \leq Pe < 1000$	
	$1000 \leq IP < 1300$	
	$1300 \leq IP < 1500$	
	$1500 \leq IP < 1700$	
	$1700 \leq IP < 2000$	
	$2000 \leq IP < 2200$	
	$2200 \leq IP < 2500$	
	$Pe > 2500$	

Gravedad API	Intervalo ideal	
	$API < 8$	
	$8 \leq API < 10$	
	$10 \leq API < 12$	
	$12 \leq API < 15$	
	$15 \leq API < 20$	
	$20 \leq IP < 24$	
	$24 \leq API < 28$	
	$28 \leq API < 30$	
	$API > 30$	

Grado de desviación del Pozo F(gra)	Intervalo ideal	
	$0 \leq Gra < 15$	
	$15 \leq Gra < 30$	
	$30 \leq Gra < 45$	
	$45 \leq Gra < 60$	
	$Gra > 60$	

Diámetro de tubería (revestidor) F(DR)	Intervalo ideal	
	$4,5 \leq DR < 5,5$	
	$5,5 \leq DR < 7$	
	$7 \leq DR < 9^{5/8}$	
	$DR > 9^{5/8}$	

Diámetro de tubería (Eductor) F(DE)	Intervalo ideal	
	$2^{3/8} \leq DE < 2^{7/8}$	
	$2^{7/8} \leq DE < 3^{1/2}$	
	$3^{1/2} \leq DE < 4^{1/2}$	
	$4^{1/2} \leq DE < 5^{1/2}$	
	$DE > 5^{1/2}$	

Temperatura al tope de la formación	Intervalo ideal	
F(T)	$T < 80$	
	$80 \leq T < 90$	
	$90 \leq T < 100$	
	$100 \leq T < 120$	
	$120 \leq T < 140$	
	$140 \leq T < 160$	
	$160 \leq T < 180$	
	$180 \leq T < 200$	
	$T > 200$	

Presión Estática en el Yacimiento	Intervalo ideal	
F(Pe)	$Pe < 2000$	
	$2000 \leq Pe < 2500$	
	$2500 \leq Pe < 3000$	
	$3000 \leq Pe < 3500$	
	$3500 \leq Pe < 4000$	
	$4000 \leq Pe < 4500$	
	$4500 \leq Pe < 5000$	
	$5000 \leq Pe < 5500$	
	$Pe > 5500$	

Gravedad API	Intervalo ideal	
F(API)	$API < 15$	
	$15 \leq API < 18$	
	$18 \leq API < 21$	
	$21 \leq API < 24$	
	$24 \leq API < 27$	
	$27 \leq API < 30$	
	$30 \leq API < 32$	
	$API > 32$	

Diámetro de tubería (revestidor)	Intervalo ideal	
F(DR)	$4,5 \leq DR < 5,5$	
	$5,5 \leq DR < 7$	
	$DR < 7$	
Diámetro de tubería (Eductor)	Intervalo ideal	
F(DE)	$2^{3/8} \leq DE < 2^{7/8}$	
	$2^{7/8} \leq DE < 3^{1/2}$	
	$3^{1/2} \leq DE < 4^{1/2}$	
	$4^{1/2} \leq DE < 5^{1/2}$	
	$DE > 5^{1/2}$	

APÉNDICE II
RESULTADOS
OBTENIDOS

Bombeo Mecanico

	IP	q	rgl	Pe	API	Arenamiento	Diam Resv	Diam. Educt	Desviacion	Comp. Afluen	Tipo pozo	Cons. Elect	Agot. Yac
IP	1	0,2	0,33333333	0,2	0,2	0,14285714	0,2	0,2	0,14285714	0,33333333	0,2	0,2	0,5
q	5	1	0,33333333	1	0,33333333	0,2	0,2	0,2	0,14285714	1	0,25	0,33333333	0,25
rgl	3	3	1	1	0,33333333	0,2	0,2	0,25	0,14285714	1	0,2	0,25	0,2
Pe	5	1	1	1	0,33333333	0,2	0,14285714	0,2	0,14285714	1	0,2	0,25	0,2
API	5	3	3	3	1	0,33333333	0,2	0,33333333	0,25	1	0,5	0,33333333	0,5
Arenamiento	7	5	5	5	3	1	1	1	0,33333333	1	0,25	0,5	0,2
Diam Resv	5	5	5	7	5	1	1	1	1	1	0,16666667	0,33333333	0,33333333
Diam. Educt	5	5	4	5	3	1	1	1	0,25	1	0,2	0,25	0,2
Desviacion	7	7	7	7	4,00	3	1	4	1	1	0,25	0,33333333	0,5
Comp. Afluen	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,16666667	0,16666667	0,33333333
Tipo pozo	5	4	5	5	2	4	6	5	4	6	1	0,2	0,2
Cons. Elect	5	3	4	4	3	2	3	4	3	6	5	1	0,33333333
Agot. Yac	2	4	5	5	2	5	3	5	2	3	5	3	1
$\sum yi =$	58	42,2	41,6666667	45,2	25,2	19,0761905	17,9428571	23,1833333	13,4047619	24,3333333	13,3833333	7,15	4,75

	IP	q	rgl	Pe	API	Arenamiento	Diam Resv	Diam. Educt	Desviacion	Comp. Afluen	Prod Para Asf	escamas	Corrosion
IP	0,01724138	0,00473934	0,008	0,00442478	0,00793651	0,00748877	0,0111465	0,00862689	0,01065719	0,01369863	0,01494396	0,02797203	0,10526316
q	0,0862069	0,02369668	0,008	0,02212389	0,01322751	0,01048427	0,0111465	0,00862689	0,01065719	0,04109589	0,01867995	0,04662005	0,05263158
rgl	0,05172414	0,07109005	0,024	0,02212389	0,01322751	0,01048427	0,0111465	0,01078361	0,01065719	0,04109589	0,01494396	0,03496503	0,04210526
Pe	0,0862069	0,02369668	0,024	0,02212389	0,01322751	0,01048427	0,00796178	0,00862689	0,01065719	0,04109589	0,01494396	0,03496503	0,04210526
API	0,0862069	0,07109005	0,072	0,06637168	0,03968254	0,01747379	0,0111465	0,01437815	0,01865009	0,04109589	0,0373599	0,04662005	0,10526316
Arenamiento	0,12068966	0,11848341	0,12	0,11061947	0,11904762	0,05242137	0,05573248	0,04313444	0,02486679	0,04109589	0,01867995	0,06993007	0,04210526
Diam Resv	0,0862069	0,11848341	0,12	0,15486726	0,1984127	0,05242137	0,05573248	0,04313444	0,07460036	0,04109589	0,0124533	0,04662005	0,07017544
Diam. Educt	0,0862069	0,11848341	0,096	0,11061947	0,11904762	0,05242137	0,05573248	0,04313444	0,01865009	0,04109589	0,01494396	0,03496503	0,04210526
Desviacion	0,12068966	0,16587678	0,168	0,15486726	0,15873016	0,1572641	0,05573248	0,17253774	0,07460036	0,04109589	0,01867995	0,04662005	0,10526316
Comp. Afluen	0,05172414	0,02369668	0,024	0,02212389	0,03968254	0,05242137	0,05573248	0,04313444	0,07460036	0,04109589	0,0124533	0,02331002	0,07017544
Prod Para Asf	0,0862069	0,09478673	0,12	0,11061947	0,07936508	0,20968547	0,3343949	0,21567218	0,29840142	0,24657534	0,0747198	0,02797203	0,04210526
escamas	0,0862069	0,07109005	0,096	0,08849558	0,11904762	0,10484274	0,16719745	0,17253774	0,22380107	0,24657534	0,373599	0,13986014	0,07017544
Corrosion	0,03448276	0,09478673	0,12	0,11061947	0,07936508	0,26210684	0,16719745	0,21567218	0,14920071	0,12328767	0,373599	0,41958042	0,21052632

n= 13

$\sum xi$
0,24213912
0,3531973
0,35834731
0,34009527
0,62733868
0,9368064
1,07420358
0,83340592
1,43995758
0,53415055
1,94050458
1,95942906
2,36042463

$\sum xi/n =$	W
0,01862609	
0,02716902	
0,02756518	
0,02616117	
0,04825682	
0,07206203	
0,08263104	
0,06410815	
0,11076597	
0,0410885	
0,14926958	
0,15072531	
0,18157113	

A.w
0,26807872
0,40535904
0,41492462
0,38991157
0,73043177
1,12543594
1,29751321
1,00624329
1,77512645
0,66620901
2,57685083
2,71918903
3,16471013
#N/A
#N/A

A.w/W
14,3926486
14,9198972
15,0524921
14,9042072
15,1363423
15,6175996
15,7024906
15,6960281
16,0259193
16,2140002
17,2630671
18,0406926

IC= 0,1279832

RC= 0,0815179

$\lambda_{max} = 1/n \sum A.w/W = 14,5357988$

Bombeo Eletrosurgible

	IP	q	rgl	Pe	API	T	Arenamiento	Corte Agua	Diam Resv	Diam. Educt	Desviacion	Comp. Afluen	Cons. Elect	Viscosidad	Mec. Prod
IP	1	0,5	0,2	0,5	0,2	0,25	0,33333333	0,2	0,25	0,33333333	0,16666667	0,5	0,2	0,33333333	0,16666667
q	2	1	0,5	0,5	0,25	0,2	0,5	0,5	0,2	0,25	0,25	0,5	1	1	0,25
rgl	5	2	1	1	0,5	0,5	0,2	0,33333333	0,25	0,33333333	0,25	0,33333333	0,33333333	0,5	0,2
Pe	2	2	1	1	0,25	0,33333333	0,2	0,2	0,25	0,33333333	0,2	1	0,2	0,33333333	0,33333333
API	5	4	2	4	1	0,5	0,25	1	0,2	1	0,33333333	1	1	1	0,2
T	4	5	2	3	2	1	1	1	0,25	1	0,33333333	1	0,33333333	0,25	0,14285714
Arenamiento	3	2	5	5	4	1	1	1	0,2	0,2	1	1	1	1	0,33333333
Corte Agua	5	2	3	5	1	1	1	1	1	1	1	1	0,33333333	0,33333333	0,33333333
Diam Resv	4	5	4	4	5	4	5	1	1	0,33333333	1	0,33333333	1	0,33333333	1
Diam. Educt	3	4	3	3	1	1	5	1	1	1	1	1	1	0,5	0,33333333
Desviacion	6	4	4	5	3	3	1	1	3	1	1	1	0,5	1	0,5
Comp. Afluen	2	2	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Cons. Elect	5	1	3	5	1	3	1	3	3	1	2	1	1	0,5	0,5
Viscosidad	3	1	2	3	1	4	1	3	1	2	1	1	2	1	0,33333333
Mec. Prod	6	4	5	3	5	7	3	3	3	3	2	2	2	3	1
Σyi	56	39,5	38,7	44	26,2	27,78333333	21,48333333	18,23333333	15,6	14,45	11,86666667	13,33333333	12,23333333	12,75	5,95952381

	IP	q	rgl	Corte de Agua	Pe	API	T	arenamiento	Diam Resv	Diam. Educt	Desviacion	Comp. Afluen	Cons. Elect	Viscosidad	Mec. Prod
IP	0,01785714	0,01265823	0,00516796	0,01136364	0,00763359	0,0089982	0,015515904	0,01096892	0,01602564	0,02306805	0,01404494	0,0375	0,01634877	0,02614379	0,02796644
q	0,03571429	0,02531646	0,01291999	0,01136364	0,00954198	0,00719856	0,023273856	0,0274223	0,01282051	0,01730104	0,02106742	0,0375	0,08174387	0,07843137	0,04194966
rgl	0,08928571	0,05063291	0,02583979	0,02272727	0,01908397	0,0179964	0,009309542	0,01828154	0,01602564	0,02306805	0,02106742	0,025	0,02724796	0,03921569	0,03355973
Corte Agua	0,03571429	0,05063291	0,02583979	0,02272727	0,00954198	0,0119976	0,009309542	0,01096892	0,01602564	0,02306805	0,01685393	0,075	0,01634877	0,02614379	0,0593288
Pe	0,08928571	0,01265823	0,05167959	0,09090909	0,03816794	0,0179964	0,011636928	0,05484461	0,01282051	0,06920415	0,02808989	0,075	0,08174387	0,07843137	0,03355973
API	0,07142857	0,12658228	0,05167959	0,06818182	0,07633588	0,0359928	0,046547711	0,05484461	0,01602564	0,06920415	0,02808989	0,075	0,02724796	0,01960784	0,02397123
T	0,05357143	0,05063291	0,12919897	0,11363636	0,15267176	0,0359928	0,046547711	0,05484461	0,01282051	0,01384083	0,08426966	0,075	0,08174387	0,07843137	0,0593288
Arenamiento	0,08928571	0,05063291	0,07751938	0,11363636	0,03816794	0,0359928	0,046547711	0,05484461	0,06410256	0,06920415	0,08426966	0,075	0,02724796	0,02614379	0,0593288
Diam Resv	0,07142857	0,12658228	0,10335917	0,09090909	0,19083969	0,14397121	0,232738557	0,05484461	0,06410256	0,06920415	0,02808989	0,075	0,02724796	0,07843137	0,0593288
Diam. Educt	0,05357143	0,10126582	0,07751938	0,06818182	0,03816794	0,0359928	0,232738557	0,05484461	0,06410256	0,06920415	0,08426966	0,075	0,08174387	0,03921569	0,0593288
Desviacion	0,10714286	0,10126582	0,10335917	0,11363636	0,11450382	0,1079784	0,046547711	0,05484461	0,19230769	0,06920415	0,08426966	0,075	0,04087193	0,07843137	0,0838932
Comp. Afluen	0,03571429	0,05063291	0,07751938	0,02272727	0,03816794	0,0359928	0,046547711	0,05484461	0,06410256	0,06920415	0,08426966	0,075	0,08174387	0,07843137	0,16779864
Cons. Elect	0,08928571	0,02531646	0,07751938	0,11363636	0,03816794	0,1079784	0,046547711	0,16453382	0,19230769	0,06920415	0,16853933	0,075	0,08174387	0,03921569	0,0838932
Viscosidad	0,05357143	0,02531646	0,05167959	0,06818182	0,03816794	0,14397121	0,046547711	0,16453382	0,06410256	0,1384083	0,08426966	0,075	0,16348774	0,07843137	0,0593288
Mec. Prod	0,10714286	0,10126582	0,12919897	0,06818182	0,19083969	0,25194961	0,139643134	0,16453382	0,19230769	0,20761246	0,16853933	0,075	0,16348774	0,23529412	0,16779864

n = 15

Σxi
0,25126122
0,44356485
0,43834162
0,40610538
0,83463561
0,79073997
1,03913567
0,90852843
1,41281199
1,13175117
1,37326289
0,98269717
1,37289584
1,25160249
2,3627957

Σxi/n = W
0,16750748
0,2957099
0,29222775
0,27073692
0,55642374
0,52715998
0,69275712
0,60568562
0,94178739
0,75450078
0,91550859
0,65513145
0,91526389
0,83440166
0,157519713

ΣW = 1

Aw
0,27951246
0,4882857
0,48456901
0,43753467
0,92545231
0,91726612
1,21446923
1,04165679
1,7681613
1,36517702
1,64898109
1,10476729
1,61974095
1,4581201
2,83127456
#N/A

Amax = 1/n Σ Aw/W =
16,10789

IC = 0,079135
RC = 0,04915217

Bomba de Cavidad Progressiva

	IP	q	rgl	Pe	API	T	Arenamiento	Corte Agua	Viscosidad	Diam Resv	Diam. Educt	Desviacion	Comp. Afluen	Prod. Solidos	C. Fluid-Elast	Corrosion
IP	1	0.33333333	0.33333333	0.5	0.33333333	0.2	0.33333333	0.25	0.2	0.14285714	0.2	0.2	0.33333333	7	7	0.14285714
q	3	0.33333333	0.33333333	1	0.33333333	0.2	0.33333333	0.5	0.5	0.14285714	0.33333333	0.2	1	6	7	0.16666667
rgl	3	3	1	1	0.5	0.25	0.5	0.5	0.33333333	0.2	0.33333333	0.2	1	5	5	0.2
Pe	2	1	1	1	0.25	0.2	0.33333333	0.25	0.2	0.16666667	0.33333333	0.2	1	6	5	0.2
API	3	3	2	4	1	0.33333333	0.5	0.5	1	0.33333333	0.5	1	1	5	5	0.25
T	5	5	4	5	3	1	1	1	0.5	0.5	0.33333333	1	1	3	3	1
Arenamiento	3	3	2	3	2	1	1	1	1	1	0.33333333	0.5	0.5	1	2	0.5
Corte Agua	4	2	2	4	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	0.5
Viscosidad	5	2	3	5	1	2	1	1	1	1	1	1	1	3	4	1
Diam Resv	7	7	5	6	3	3	3	1	1	1	1	0.33333333	1	3	3	1
Diam. Educt	5	3	3	3	2	1	2	1	1	1	1	1	1	0.5	3	0.5
Desviacion	5	5	5	5	1	1	2	1	1	3	1	1	1	4	4	0.33333333
Comp. Afluen	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5	5	0.33333333
Prod. Solidos	0.14285714	0.16666667	0.2	0.16666667	0.2	0.33333333	0.5	0.25	0.33333333	0.33333333	0.33333333	0.25	0.2	1	4	0.33333333
C. Fluid-Elast	0.14285714	0.14285714	0.2	0.2	0.2	0.33333333	0.5	0.25	0.25	0.33333333	0.33333333	0.25	0.2	0.25	1	1
Corrosion	7	6	5	5	4	1	2	1	1	1	2	3	3	3	1	1
ΣYi	56.2857143	42.6428571	35.0666667	44.8666667	21.8166667	14.85	17	11	11.3166667	11.3190476	11.8666667	12.1333333	15.7333333	57.75	63	8.95952381

	IP	q	rgl	Pe	API	T	Arenamiento	Corte Agua	Viscosidad	Diam Resv	Diam. Educt	Desviacion	Comp. Afluen	Prod. Solidos	C. Fluid-Elast	Corrosion
IP	0.0177665	0.00781686	0.0095057	0.0114413	0.01527884	0.01346801	0.01960784	0.02272727	0.01767305	0.01262095	0.01685393	0.01648352	0.02118644	0.12121212	0.11111111	0.01594472
q	0.05329949	0.02345059	0.0095057	0.02228826	0.01527884	0.01346801	0.01960784	0.04545455	0.04418262	0.01262095	0.02809899	0.01648352	0.06355932	0.1038961	0.11111111	0.01860218
rgl	0.05329949	0.07035176	0.02851711	0.02228826	0.02291826	0.01683502	0.02941176	0.04545455	0.02945508	0.01766933	0.02809899	0.01648352	0.06355932	0.08658009	0.07936508	0.02232261
Pe	0.03553299	0.02345059	0.02851711	0.02228826	0.01145913	0.01346801	0.01960784	0.02272727	0.01767305	0.01472444	0.02809899	0.01648352	0.06355932	0.1038961	0.07936508	0.02232261
API	0.05329949	0.07035176	0.05703422	0.08915305	0.04583652	0.02244669	0.02941176	0.04545455	0.08836524	0.02944889	0.04213483	0.08241758	0.06355932	0.08658009	0.07936508	0.02790327
T	0.08883249	0.11725293	0.11406844	0.11144131	0.13750955	0.06734007	0.05882353	0.04545455	0.04418262	0.02944889	0.08426966	0.08241758	0.06355932	0.05194805	0.04761905	0.11161307
Arenamiento	0.05329949	0.07035176	0.05703422	0.06686478	0.09167303	0.06734007	0.05882353	0.09090909	0.08836524	0.02944889	0.04213483	0.04120879	0.06355932	0.03463203	0.03174603	0.05580654
Corte Agua	0.07106599	0.04680117	0.05703422	0.08915305	0.09167303	0.13468013	0.05882353	0.09090909	0.08836524	0.08834666	0.08426966	0.08241758	0.06355932	0.06926407	0.06349206	0.11161307
Viscosidad	0.08883249	0.04680117	0.0855133	0.11144131	0.04583652	0.05882353	0.09090909	0.08836524	0.08834666	0.08426966	0.08241758	0.06355932	0.05194805	0.06349206	0.03174603	0.05580654
Diam Resv	0.12436548	0.1641541	0.14258555	0.13372957	0.13750955	0.2020202	0.17647059	0.09090909	0.08836524	0.08834666	0.08426966	0.02747253	0.06355932	0.05194805	0.04761905	0.11161307
Diam. Educt	0.08883249	0.07035176	0.0855133	0.06686478	0.09167303	0.06734007	0.11764706	0.09090909	0.08836524	0.08834666	0.08426966	0.08241758	0.06355932	0.08658009	0.04761905	0.05580654
Desviacion	0.08883249	0.11725293	0.14258555	0.11144131	0.04583652	0.06734007	0.11764706	0.09090909	0.08836524	0.26503997	0.08426966	0.08241758	0.06355932	0.06926407	0.06349206	0.03720436
Comp. Afluen	0.05329949	0.02345059	0.02851711	0.02228826	0.04583652	0.06734007	0.05882353	0.09090909	0.08836524	0.08834666	0.08426966	0.08241758	0.06355932	0.08658009	0.07936508	0.03720436
Prod. Solidos	0.00253807	0.00390843	0.00570342	0.00371471	0.0091673	0.02244669	0.02941176	0.02272727	0.02945508	0.02944889	0.02809899	0.0206044	0.01271186	0.01731602	0.06349206	0.03720436
C. Fluid-Elast	0.00253807	0.00390843	0.00570342	0.00445765	0.0091673	0.02244669	0.02941176	0.02272727	0.02209131	0.02944889	0.02809899	0.0206044	0.01271186	0.004329	0.01587302	0.11161307
Corrosion	0.12436548	0.14070352	0.14258555	0.11144131	0.18334607	0.06734007	0.11764706	0.09090909	0.08836524	0.08834666	0.16853933	0.24725275	0.19067797	0.05194805	0.01587302	0.11161307

n= 16

CRITERIO	D PONDERADO
IP	0.02815006
q	0.03755619
rgl	0.03953757
Pe	0.03289783
API	0.05704765
T	0.07848632
Arenamiento	0.05894985
Corte Agua	0.08072299
Viscosidad	0.0810617
Diam Resv	0.10843361
Diam. Educt	0.07488823
Desviacion	0.09586608
Comp. Afluen	0.06263579
Prod. Solidos	0.02112126
C. Fluid-Elast	0.02153523
Corrosion	0.12130964

Σxi	W
0.45040101	0.02815006
0.60089898	0.03755619
0.63260113	0.03953757
0.52316523	0.03289783
0.91276233	0.05704765
1.25578111	0.07848632
0.94319765	0.05894985
1.29156789	0.08072299
1.29698723	0.0810617
1.73493772	0.10843361
1.1821167	0.07488823
1.5345728	0.09586608
1.0055264	0.06263579
0.33794022	0.02112126
0.3445637	0.02153523
1.94095422	0.12130964

ΣW= 1

A-w
0.54738513
0.72301357
0.78027941
0.63552361
1.11679348
1.55845588
1.11767882
1.52314087
1.54535743
2.12618015
1.42003593
1.87483004
1.14605301
0.38319052
0.37705757
2.30985018
#N/A
#N/A

A-wW
19.4452542
19.2515175
19.735138
19.4362644
19.5765042
19.8564016
18.958235
19.0639648
19.6081288
18.9620711
19.5348195
18.3283537
18.1424052
17.5088702

IC= 0.1261505
RC= 0.07739329

Imax= 1/nΣA.w/W= 17.8922658