

**CONTRIBUCIÓN DE UN MODELO DE DECISIÓN MULTICRITERIO PARA LA
SELECCIÓN DEL MÉTODO DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL ÓPTIMO PARA
UN CAMPO DE ESTUDIO**

ZULMA LIZETH MELO CARLOS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
MAESTRIA EN INGENIERÍA DE PETRÓLEOS Y GAS
BUCARAMANGA
AÑO 2020**

**CONTRIBUCIÓN DE UN MODELO DE DECISIÓN MULTICRITERIO PARA LA
SELECCIÓN DEL MÉTODO DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL ÓPTIMO PARA
UN CAMPO DE ESTUDIO**

ZULMA LIZETH MELO CARLOS

**Trabajo de grado para optar por el título de
Magister en Ingenierías de Petróleos y Gas**

Director

Erik Giovany Montes

Magister en Ingeniería de Hidrocarburos

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
MAESTRIA EN INGENIERÍA DE PETRÓLEOS Y GAS
BUCARAMANGA
AÑO 2020**

DEDICATORIA

El presente trabajo investigativo es dedicado principalmente a Dios, por ser el inspirador y darme fuerza para continuar en este camino. A mi familia, por su amor, apoyo, ejemplo y sacrificio, a ustedes les debo todo lo que he alcanzado como persona y profesional y a todas las personas que me han apoyado y han hecho de mí una mejor persona.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo agradezco a Dios por ser mi guía y bendecir mi vida, brindándome paciencia y sabiduría para culminar con éxito mis metas propuestas. A mi familia, por impulsarme a cumplir mis sueños y creer en mí. A la empresa donde trabajo, y a los Docentes de la Universidad Industrial de Santander, en especial a mi director de tesis quien estuvo guiándome académicamente con su experiencia y profesionalismo.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	15
1 OBJETIVOS.....	23
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	23
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
2 MARCO REFERENCIAL	24
2.1 ANTECEDENTES.....	24
2.2 MARCO CONCEPTUAL	31
2.2.1 Métodos de decisión multicriterio.	31
2.2.2 Clasificación métodos de decisión multicriterio.	37
2.2.3 Estado del arte de los métodos de selección multicriterio aplicables a la selección de métodos de levantamiento artificial..	40
2.2.3.1 Método TOPSIS.....	41
2.2.3.2 Método ELECTRE.	43
2.2.3.3 Método AHP..	44
2.2.3.4 Método por matriz de evaluación tecnológica (MET).....	45
2.2.3.5 Método VIKOR.....	46
2.2.3.6 Método COPRAS.	47
2.2.3.7 Método PROMETHEE.	49
2.2.3.8 Método axiomático de Arrow-Raynaud.	50
2.2.3.9 Método GRIP..	52
2.2.3.10 Método UTA.....	53
2.2.3.11 Método RUTA.....	54
2.2.3.12 Óptimo de Pareto.....	54
2.3 SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL	59
2.3.1 Bombeo mecánico.....	62
2.3.2 Bombeo electrosumergible.....	63

2.3.3	Bombeo de cavidades progresivas.	65
2.3.4	Gas lift.	66
2.3.5	Bombeo hidráulico.	67
2.4	MARCO LEGAL	69
3	MÉTODO	73
3.1	POBLACIÓN	74
3.2	DESCRIPCIÓN CAMPO DE ESTUDIO.....	76
3.3	INFORME DE GEOLOGÍA	78
3.4	ESTRATIGRAFÍA	80
3.5	INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	82
3.5.1	Ecuaciones Planteadas.....	91
3.6	RESULTADOS	92
3.7	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	97
4	CONCLUSIONES	99
	BIBLIOGRAFÍA.....	103

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Comparación MADM y MODM.....	37
Tabla 2 Métodos multicriterio existentes.....	40
Tabla 3 Resumen de estado del arte	57
Tabla 4 Estado actual de los pozos del campo.....	77
Tabla 5 Características de los pozos	78
Tabla 6 Método de decisión multicriterio –MDMC.....	83
Tabla 7 Valores Numéricos.....	84
Tabla 8 Matriz de evaluación	85
Tabla 9 Screening bombeo mecánico.....	86
Tabla 10 Screening bombeo hidráulico.....	87
Tabla 11 Screening PCP- cavidades progresivas.....	88
Tabla 12 Screening bombeo electrosumergible.....	89
Tabla 13 Screening gas lift.....	90
Tabla 14 Calificación de parámetros pozo 1	93
Tabla 15 Jerarquización de Resultados y Selección Pozo1	94
Tabla 16 Calificación de parámetros pozo 2.....	95
Tabla 17 Jerarquización de Resultados y Selección Pozo2	96

LISTA DE GRAFICOS

Gráfico 1 Jerarquización de Resultados y Selección Pozo1	94
Gráfico 2 Jerarquización de Resultados y Selección Pozo 2	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Proceso de decisión multicriterio	34
Figura 2 Matriz	35
Figura 3 Clasificación MADM.....	38
Figura 4 Manejo de Petróleo y Gas en Superficie.....	60
Figura 5 Comportamiento de la presión en el sistema de producción	61
Figura 6 Bombeo mecánico	63
Figura 7 Bombeo electrosumergible	64
Figura 8 Bombeo de cavidades progresivas	66
Figura 9 Gas lift.....	67
Figura 10 Bombeo hidráulico	68

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Localización general Bloque Campo de estudio	76
Ilustración 2 Marco Geológico del Bloque Campo de estudio.....	79
Ilustración 3 Columna Estratigráfica Generalizada	81

GLOSARIO

BOMBEO DE CAVIDADES PROGRESIVAS; tipo de unidad de bombeo con varilla de succión que utiliza un rotor y un estator. La rotación de las varillas por medio de un motor eléctrico en la superficie hace que el fluido contenido en una cavidad fluya hacia arriba.

BOMBEO MECÁNICO; es un procedimiento de succión y transferencia casi continua del petróleo hasta la superficie. La unidad de superficie imparte el movimiento de sube y baja a la sarta de varillas de succión que mueve el pistón de la bomba, colocada en la sarta de producción, a cierta profundidad del fondo del pozo.

CAMPO; zona con abundancia de pozos de los que se extrae hidrocarburos del subsuelo. Debido a que las formaciones subterráneas que contienen petróleo.

GAS LIFT; es un método que utiliza gas a presión como medio de levantamiento, a través de un proceso mecánico o un orificio en la tubería de producción donde el gas se inyecta a la tubería reductora en forma intermitente, con el propósito de producir la columna de fluidos en el pozo por etapas.

METODOS DECISIÓN MULTICRITERO; son instrumentos que se utilizan para evaluar diversas posibles soluciones a un determinado problema, considerando un número variable de criterios, se utiliza para apoyar la toma de decisiones en la selección de la solución más conveniente.

SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL; se refiere al uso de medios artificiales para incrementar el flujo de líquidos, tales como petróleo o agua, desde pozos de producción hacia la superficie. Generalmente esto se logra por medio de

dispositivos mecánicos en el pozo, tales como bombas, o reduciendo el peso de la columna hidrostática por medio de la inyección de gas a cierta profundidad del pozo.

RESUMEN EN ESPAÑOL

TITULO: CONTRIBUCIÓN DE UN MODELO DE DECISIÓN MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN DEL MÉTODO DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL ÓPTIMO PARA UN CAMPO DE ESTUDIO.

AUTOR: Zulma Lizeth Melo Carlos

PALABRAS CLAVE: Modelo de decisión multicriterio, sistemas de levantamiento artificial, óptimo de Pareto, petróleo.

DESCRIPCIÓN: Los métodos de levantamiento artificial son implementados en los pozos cuando la presión de fondo no es suficiente para superar las pérdidas de presión hasta superficie, para la selección del método de levantamiento artificial óptimo se debe incluir una gran cantidad de variables y parámetros que son difíciles de analizar y cuantificar, los enfoques de análisis de decisiones de criterios múltiples son herramientas poderosas que se utilizan para evaluar problemas en el proceso de toma de decisiones con múltiples criterios para encontrar una solución, estos métodos tienen un fuerte enfoque de apoyo a la decisión e interactúan con otras disciplinas, como los sistemas inteligentes que manejan la incertidumbre, en esta tesis como objetivo general busca proponer un método de selección multicriterio que mediante técnicas matemáticas permita la selección del método de levantamiento artificial óptimo para un campo de estudio, la metodología se define el paradigma empírico analítico con un enfoque cuantitativo, de tipo observacional- interpretativo. Los resultados al aplicar el método multicriterio propuesto arrojaron para cada método de levantamiento artificial calificaciones para propiedades de los fluidos, estado mecánico y características de operación del pozo, se generaron como resultados en el pozo 1; para bombeo mecánico 1,17 puntos, bombeo hidráulico 1,60 puntos, bombeo por cavidades progresivas 1,28 puntos, bombeo electrosumergido 1,63 puntos, gas lift 1,53 puntos, donde resulta que el bombeo electrosumergible es el sistema con mejor puntuación y por ende el método de levantamiento artificial óptimo para el pozo 1. La calificación final del sistema en el pozo 2; para bombeo mecánico es de 1,17 puntos, bombeo hidráulico 1,63 puntos, bombeo por cavidades progresivas 1,09 puntos, bombeo electrosumergible 1,81 puntos, gas lift 1,69 puntos. Donde resulta que bombeo electrosumergible es el sistema con mejor puntuación y por ende el método de levantamiento artificial óptimo para el pozo 2.¹

¹ * Tesis Maestría

** Facultad de Ingeniería Física Química. Escuela de Ingeniería del Petróleo. Director: Erik Giovany Montes Magister en Ingeniería de Hidrocarburos.

ABSTRACT

TITLE: CONTRIBUTION OF A MULTI-CRITERIA DECISION MODEL FOR THE SELECTION OF THE OPTIMAL ARTIFICIAL SURVEY METHOD FOR A FIELD OF STUDY.

AUTHOR: Zulma Lizeth Melo Carlos

KEY WORDS: Multicriteria decision model, artificial lifting systems, Pareto optimum, oil.

DESCRIPTION: Artificial lifting methods are implemented in wells when the bottom pressure is not sufficient to overcome pressure losses to the surface, for the selection of the optimal artificial lifting method a large number of variables and parameters must be included that are difficult to determine. analyze and quantify, multi-criteria decision analysis approaches are powerful tools used to assess problems in the multi-criteria decision-making process to find a solution, these methods have a strong decision support approach and interact with Other disciplines, such as intelligent systems that handle uncertainty, in this thesis as a general objective seeks to propose a multi-criteria selection method that through mathematical techniques allows the selection of the optimal artificial lifting method for a field of study, the methodology defines the paradigm the analytical empiricist with an emp oque quantitative, observational-interpretive type. The results when applying the proposed multi-criteria method yielded for each artificial lift method ratings for fluid properties, mechanical condition and operating characteristics of the well, they were generated as results in well 1; for beam pumping 1.17 points, hydraulic pumping 1.60 points, pumping for progressive cavities 1.28 points, electro-submerged pumping 1.63 points, gas lift 1.53 points, where it turns out that electro-submersible pumping is the system with the best score and therefore the optimal artificial lift method for well 1. The final qualification of the system in well 2; for beam pumping it is 1.17 points, hydraulic pumping 1.63 points, pumping by progressive cavities 1.09 points, electro-submersible pumping 1.81 points, gas lift 1.69 points. Where it turns out that electro-submersible pumping is the system with the best score and therefore the optimal artificial lifting method for well 2.²

² Magister Thesis

** Faculty of Physical Chemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Director: Erik Giovany Montes Magister in Hydrocarbon Engineering.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de levantamiento artificial son usados para adicionar energía a la columna de fluido de un pozo y así iniciar o mejorar la producción cuando el yacimiento no tiene la energía suficiente para llevar los fluidos desde el reservorio a la superficie o las tasas de producción son bajas, los sistemas más comunes son bombeo mecánico, bombeo hidráulico, bombeo electrosumergible, bombeo por cavidades progresivas y gas lift.

Los procesos de levantamiento transfieren energía desde fondo o disminuyen la densidad de la columna para reducir la presión hidrostática en contra de la formación generalmente, es así como la selección del método de levantamiento artificial adecuado incluye la evaluación de diferentes variables y parámetros que pueden ser complejos y contradictorios entre ellos mismos.

Escoger el método eficiente para las condiciones y características de cada pozo es fundamental para garantizar el ciclo de gestión de extracción de los hidrocarburos, es aquí donde los métodos de decisión multicriterio (MDMC) se han aplicado para evaluar diferentes alternativas para resolver un problema en relación con cada criterio pues proponen la mejor solución para esa dificultad, siendo útiles especialmente cuando se debe seleccionar la alternativa más apropiada en un proceso.

En esta investigación se estudian diversos MDMC aplicables a la selección de sistemas de levantamiento artificial, para proponer y aplicar un método de toma de decisión en un campo de estudio que apoye a los decisores en la evaluación de diferentes situaciones problemáticas externas e internas

que afectan la selección e implementación del método de levantamiento artificial óptimo en los pozos.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las herramientas multicriterio se han comenzado a extender desde los años setenta comenzando en las ciencias administrativas y migrando como numerosas metodologías a otros campos de acción, son sistemas que ayudan a la decisión del ser humano basadas en la consideración de varios criterios. Normalmente estos instrumentos se encaminan a la realización de un proceso de toma de decisión, considerando las alternativas ante un problema al analizar la situación, identificar la dificultad y los aspectos relevantes que permitan evaluar las posibles soluciones.

En la actual era de la industria 4.0 la potencialidad de este tipo de métodos es alta, ya que responde al manejo de grandes grupos de datos que son adaptables a un sin número de tecnologías según las necesidades específicas del sector industrial. Su adaptabilidad para ser utilizada en todo el ciclo de los proyectos, en distintas situaciones y en la extensión que se requiera, aprueba la integración y la comparación de criterios de distinto tipo que por otros métodos sería muy dispendioso³.

En general la industria colombiana también enfrenta a diario la necesidad de innovar, reducir costos y hacer más eficientes los procesos. La explotación y producción de petróleo y gas ha tenido que acudir a nuevos métodos en ambientes complicados como aguas profundas y ultra profundas, petróleo no convencional producido a partir de esquistos

³ BARRIO, Armando; PÉREZ, Andrés. La negativa a la fracturación hidráulica crece en Europa. [En línea]. Disponible en: [http:// www.iularioja.org/fracking/](http://www.iularioja.org/fracking/).

bituminosos mediante pirolisis, hidrogenación o disolución térmica, zonas ambientales y socialmente complejas. Pues como indica Saavedra y Jiménez⁴, los desafíos trascendentales en la industria del petróleo tienen que ver con el incremento de reservas, la perfección del proceso de extracción-producción con una relación reservas-producción, la evacuación de los crudos que cada vez son más pesados, así como a la conversión profunda y a la mejora de la calidad de combustibles producidos en las refinerías, siendo estos requerimientos evidentes en toda la cadena de abastecimiento para la producción de combustibles.

En relación a lo expuesto por Saavedra y Jiménez escoger los métodos de levantamiento artificial, eficientes para las condiciones del pozo a extraer, reduciendo imprevistos y minimizando el impacto ambiental, es fundamental en el ciclo de la gestión de extracción de petróleo y gas, pues si un método es implementado cuando la presión de fondo no es suficiente para superar las pérdidas de presión hasta la superficie y para mejorar la producción de los pozos no se alcanzarían las tasas deseadas⁵.

En el campo seleccionado para desarrollar este proyecto se refleja la necesidad de obtener datos con los cuales se tome decisiones sobre el método de levantamiento artificial con el cual se adelanta la extracción, invertir en la adquisición de tecnología para esto significa un costo adicional que muchas veces es difícil justificarlo desde lo económico. De todas formas, con o sin toma de información automatizada, el factor humano es

⁴ SAAVEDRA TRUJILLO, Néstor Fernando; JIMÉNEZ INOCENCIO, Favio Yovany. Necesidades de Innovación y Tecnología para la industria de petróleo y gas en Colombia. En Revista de Ingeniería. Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia. Enero – junio, vol.10, 2014, p. 50.

⁵ *Ibíd.*, p. 52.

excluyente y se debe trabajar en la calidad, veracidad y trazabilidad del dato, es evidente que se requiere la validación de los datos de producción y condiciones de operación con el fin de garantizar efectividad en el análisis y toma de información. Los métodos de decisión multicriterio (MDMC) evalúan diferentes alternativas para resolver un problema en relación con cada criterio, y proponen la mejor solución para esa dificultad, son muy útiles, especialmente cuando se debe seleccionar la alternativa más apropiada en un proceso como es la selección del método de levantamiento artificial óptimo para el campo petrolero seleccionado en este estudio.

En este trabajo se estudiarán diversos MDMC aplicables a la selección de sistemas de levantamiento artificial, para proponer un método de toma de decisión que apoye los decisores en la evaluación de diferentes situaciones problemáticas externas e internas que afectan la escogencia e implementación del método de levantamiento artificial óptimo en los pozos.

PROPÓSITO Y FUNDAMENTACIÓN

Esta investigación es un ejercicio académico de investigación, donde aplicando un método de selección multicriterio y técnicas matemáticas a un proceso que permita la selección del método de levantamiento artificial óptimo para un campo de estudio, con dos pozos seleccionados a conveniencia del investigador se busca mejorar la calidad del proceso de gestión del ingeniero de petróleos en los mismos.

Como indica Constante⁶ el sistema de bombeo electrosumergible, pretende satisfacer necesidades de las compañías operadoras, mostrando eficiencia y eficacia en todas las acciones que sean necesarias emprender. Sin embargo, muchas veces, no se conoce la información suficiente a cerca del pozo para la correcta selección del equipo, lo que puede causar que surjan fallas en el sistema de bombeo. Entonces al buscar una alternativa segura, localizando, detectando y formulando el procedimiento más adecuado a seguir para cada una de las fallas presentes en el sistema de bombeo electrosumergible se puede optimizar el proceso e incrementar la vida útil de los equipos.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Durante la vida de los pozos, se han presentado problemas operativos especialmente por bloqueos en fondo de la bomba debido a atascamientos por arena, lo cual ha ocasionado diferidas de producción, dificultades al momento del arranque y alta producción de arena en superficie. Como consecuencia de lo anterior, el run life de las bombas ha disminuido hasta 296 días⁷.

Los inconvenientes mencionados anteriormente pueden conllevar a la necesidad de hacer workover en tiempos menores al promedio histórico del campo, e incluso pueden generar la pérdida total de los pozos por el colapso de la formación en fondo. Adicionalmente, se puede presentar daños en las líneas de producción y equipos de superficie por erosión

⁶ CONSTANTE BARRAGAN, Luis Alberto. Localización, detección y análisis de fallas en el sistema de bombeo electrosumergible para la región amazónica del Ecuador. Tesis de pregrado, Latacunga: Escuela Politécnica Del Ejército ESPE – LATACUNGA, 2016.

⁷ PEÑA, Op.cit., p. 34.

debido a la generación de arena, incrementando los costos operativos por los mantenimientos preventivos y correctivos de equipos. Por otra parte, la operadora del campo de estudio seleccionado para esta investigación no cuenta con ningún modelo de selección de levantamiento artificial establecido, lo cual genera problemas y dificultades por la cantidad de criterios que se evalúan simultáneamente⁸.

Esa así que se plantea como pregunta problema; ¿mediante la aplicación de un método de selección multicriterio es posible la selección del método de levantamiento artificial óptimo para un campo de estudio?

Se formula como hipótesis que los métodos de selección multicriterio aplicados mediante técnicas matemáticas son una herramienta confiable a la hora de decidir el sistema de levantamiento artificial óptimo para un pozo de extracción de petróleo.

JUSTIFICACIÓN

Los métodos de levantamiento artificial son implementados en los pozos cuando la presión de fondo no es suficiente para superar las pérdidas de presión hasta superficie. Históricamente, en los pozos del campo de estudio se ha instalado bombeo electrosumergible, en el cual se utiliza una bomba centrífuga para levantar los fluidos aportados desde el yacimiento hasta la superficie⁹.

Para la selección del método de levantamiento artificial óptimo se debe incluir una gran cantidad de variables y parámetros que son difíciles de

⁸ CONSTANTE, Op.cit., p. 89.

⁹ BROWN, Kermit. The Technology of Artificial Lift Methods. Oklahoma; Penwell Publishing Company, 1984, p. 440.

analizar y cuantificar, los enfoques de análisis de decisiones de criterios múltiples son herramientas poderosas que se utilizan para evaluar problemas en el proceso de toma de decisiones con múltiples criterios para encontrar una solución, estos métodos tienen un fuerte enfoque de apoyo a la decisión e interactúan con otras disciplinas, como los sistemas inteligentes que manejan la incertidumbre¹⁰.

Es así que el propósito de este proyecto de investigación es mediante la implementación de un modelo de decisión multicriterio para la selección óptima del levantamiento artificial para los pozos del campo de estudio, poder evaluar diferentes situaciones problemáticas externas e internas que afectan la escogencia e implementación del método adecuado.

Al seleccionar el óptimo método de levantamiento artificial basado en una metodología de decisión multicriterio permitirá a la operadora del campo incrementar la vida útil del pozo, mitigar los problemas operativos especialmente por bloqueos en fondo de la bomba debido a atascamientos por arena, disminuir diferidas de producción, dificultades al momento del arranque y la alta producción de arena en superficie, con lo cual se cuidará la integridad de las líneas y equipos de tratamiento en superficie.

El enfoque de esta investigación se desarrolla mediante el paradigma empírico analítico de tipo cuantitativo, descriptivo y correlacional al pretender hallar relación entre los componentes método de selección multicriterio y método de levantamiento artificial. Este enfoque como indica

¹⁰ AFSORDEGAN, Arayeh. Contribution to multicriteria decision making in sustainable energy management based on Fuzzy and qualitative reasoning. Tesis Doctoral, Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2015.

Hernández¹¹, se desarrolla con el objetivo de obtener información numérica acerca de una propiedad o cualidad del objeto, proceso o fenómeno de estudio, donde se comparan magnitudes medibles conocidas al asignar valores numéricos a determinadas propiedades del objeto, así como relaciones para evaluarlas y representarlas adecuadamente apoyándose de procedimientos estadísticos.

Se describe el tipo de enfoque como descriptivo, ya que se pretende decir si es posible o no aplicar un método de selección multicriterio a la selección de métodos de levantamiento artificial en campos de extracción de petróleo y las variables a considerar, son aspectos de selección y tipos de levantamiento artificial.

¹¹ HERNANDEZ SAMPIERI, Roberto. Metodología de la investigación. México: Editorial Mc Graw Hill.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer un método de selección multicriterio que mediante técnicas matemáticas permita la selección del método de levantamiento artificial óptimo para un campo de estudio.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una revisión bibliográfica sobre el estado del arte de los métodos de selección multicriterio aplicables a la selección de métodos de levantamiento artificial.
- Definir los criterios técnicos involucrados en la selección del método óptimo de levantamiento artificial aplicables a los modelos de decisión multicriterio para el campo de estudio.
- Proponer un método de selección multicriterio que mediante técnicas matemáticas ayude a la selección de los métodos de levantamiento artificial óptimos para dos pozos seleccionados del campo de estudio.
- Describir si es posible seleccionar el método de levantamiento artificial óptimo para el campo de estudio mediante la aplicación del método de decisión multicriterio propuesto.

CAPÍTULO 1

En este apartado se exponen los referentes teóricos acerca de los métodos artificiales de levantamiento, como se seleccionan, los antecedentes y su relación con los métodos de selección multicriterio.

2 MARCO REFERENCIAL

2.1 ANTECEDENTES

En relación a esto Carranza¹⁰ explica que los diferentes criterios presentes en un pozo influyen significativamente en la selección de un sistema de levantamiento artificial y propuso la aplicación de un método matemático multicriterio, el cual implementó mediante una pequeña aplicación en Microsoft Excel con base en los screening realizados para cada uno de los métodos de levantamiento artificial el método matemático multicriterio Topsis.

Este método le permitió concluir que la toma de decisión multicriterio es un proceso que consiste en encontrar la mejor alternativa entre un conjunto de alternativas factibles basando su principio en que la alternativa elegida debe tener la menor distancia a la solución ideal positiva y la mayor distancia a la solución ideal negativa siendo útil en campos como el petrolero donde los cálculos de producción deben ser precisos¹².

¹² CARRANZA PEREZ, Julio Nolfier. Propuesta para la selección del método de levantamiento artificial a utilizar en el campo recetor. Tesis de Magíster. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander, 2014.

En el mismo sentido Navarro buscó determinar el sistema de levantamiento artificial más adecuado dentro de los parámetros técnicos y financieros aplicando el método de selección ELECTRE que considera la naturaleza difusa y la incertidumbre de los datos, para determinar la viabilidad técnica y caracterizar los costos de la instalación y la operación inicial, dando paso a una evaluación financiera para el primer año de puesta en funcionamiento en cada uno de los tres casos de estudio y la elección del SLA más adecuado.

El estudio le permitió identificar, entender y evaluar las partes que componen el problema de la selección del SLA adecuado a condiciones de un campo en fase exploratoria, procedimiento que exige implementar varias técnicas para coadyuvar a obtener una mejor decisión respecto a datos estimativos o con gran incertidumbre. Evidenciando que el método de selección ELECTRE puede ser usado en el desarrollo de diferentes proyectos que busquen la preselección de los mejores SLA, de acuerdo con una data estimada e incierta, incorporando la naturaleza difusa en la toma de decisiones, umbrales de indiferencia y preferencia¹³.

Según Peña y Serna¹² las condiciones de yacimiento del Campo Corrales como la caída de la presión original, y el aumento del porcentaje presente de agua y sedimentos, los cuales aumentan la presión de fondo fluyente del pozo y las características de los tipos de fluidos encontrados, como la viscosidad, es necesario implementar un sistema de levantamiento para vencer caídas de presión y recuperar la producción en cada uno de los

¹³ NAVARRO SABOGAL, Jhon Fredy. Selección, Diseño y Puesta en Funcionamiento del Sistema de Levantamiento Artificial más Adecuado para un Campo Ubicado en la Cuenca de los Llanos Orientales. Tesis de pregrado. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander, 2018.

pozos. La evaluación técnica la hizo por medio de una matriz de selección, cuyos criterios de selección se basan en valores teóricos que se agrupan en Screenings para cada uno de los sistemas de levantamiento artificial y a partir de esta información, realizo una evaluación de variables propias de los pozos, con las establecidas para cada sistema, determinando el sistema de levantamiento artificial adecuado para los cinco (5) pozos productores del Campo Corrales concluyendo que el método multicriterio propuesto valido las necesidades del SLA¹⁴.

En cuanto a los métodos artificiales de levantamiento Roca y Pereno ¹⁵, enfocaron su estudio a analizar el cambio de sistema de levantamiento artificial de bombeo hidráulico a bombeo electrosumergible realizado en el campo Fict, ya que el sistema de producción artificial que dominaba el campo era el bombeo hidráulico; pero luego de cierto tiempo y considerando el alto potencial que aún presenta, se optó por hacer cambio en el sistema de levantamiento artificial a Bombeo Electrosumergible, con el objetivo de incrementar la producción que ha venido decayendo debido a métodos antiguos que; o necesitaba mantenimiento o ya no resultaba efectivo para el yacimiento, provocando de esta forma que la producción de los pozos no aumentara a pesar que el yacimiento aún da para producir a mayores tasas.

¹⁴ PEÑA SEVERICHE, Kevin Andrés; SERNA VELÁSQUEZ, José Fernando. Diseño del módulo de selección preliminar de sistemas de levantamiento artificial para el manual general de completamiento de ECOPETROL S.A. Tesis de pregrado, Bogotá: Fundación Universidad De América, 2017.

¹⁵ ROCA FIGUEROA, Robert Norberto; PERERO MACÍAS, Damián Leonardo. Análisis técnico económico para el cambio de sistema de levantamiento artificial de bombeo hidráulico a bombeo electrosumergible realizado en el campo Fict". Tesis de pregrado. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica Del Litoral, 2016.

El autor indica que¹⁶ “el cambio de sistema de levantamiento artificial es una solución práctica frente a problemas económicos, cuando no es posible mantener un sistema por precio que cuesta producir un barril frente al precio de venta del mismo en el mercado”, entonces cuando los yacimientos presentan altos índices de productividad y por ende la potencia para producir de un método no es capaz de explotar a la capacidad máxima óptima del yacimiento se debe optar por un cambio en el método.

El Sistema de Levantamiento Artificial por Bombeo Electrosumergible (BES) tiene como finalidad levantar el fluido del yacimiento a superficie, por medio de la acción que realiza una bomba centrífuga de múltiples etapas. Esta bomba es accionada por un motor eléctrico que se encuentra en subsuelo, conectada a la superficie mediante un cable de potencia quien suministra la corriente eléctrica para su funcionamiento¹⁷.

Es así que Roca¹⁸ recomienda para este tipo de sistema que levanta altos niveles de fluidos a grandes profundidades, en pozos con distintas condiciones, que para su aplicación, se debe tener en cuenta los siguientes parámetros; 350° F, límite de temperatura para motores y cables, saturación de gas libre < 10%, presencia de gas, < 200 ppm (preferencia 0), presencia de arena, ~200 cps, límite de viscosidad, competición vertical, direccional.

En el mismo sentido Orjuela¹⁹ dice que un sistema de levantamiento artificial es un mecanismo externo al sistema de la formación productora,

¹⁶ ROCA, Op. Cit., p. 2.

¹⁷ ROCA, Op. Cit., p. 22.

¹⁸ ROCA, Op. Cit., p. 22

¹⁹ ORJUELA PAVA, Andrés Felipe. Evaluación técnica y financiera del desempeño del sistema de levantamiento artificial bombeo por cavidades progresivas metal- metal para la

existen diversos tipos de estos sistemas de levantamiento y son usados cuando la formación ya no posee la energía suficiente para poder desplazar los fluidos desde el fondo de la formación hasta la superficie, o cuando la tasa de producción es inferior a la deseada.

El bombeo electrosumergible es un sistema de levantamiento artificial aplicado para desplazar volúmenes de crudo con una alta eficiencia y economía, en pozos profundos, con el objeto de manejar altas tasas de flujo, entonces es un método recomendable con múltiples ventajas como; permite el levantamiento de volúmenes extremadamente altos sin dificultad, y a bajo costo, tiene elevado aporte de energía al fluido, presenta una alta eficiencia (70%), el sistema no se ve afectado por la desviación, el sistema es fácil de controlar, no ocupa grandes espacios en superficie e igualmente es aplicable a plataformas costa afuera, permite una fácil aplicación de tratamientos contra la corrosión e inhibidores de escamas y tiene disponibilidad de unidades de diversos tamaños.

De otro lado Navarro²⁰ discute sobre la necesidad de determinar qué sistema de levantamiento artificial (SLA) es el más adecuado para un campo en exploración particular, evaluando un proceso propicio para tomar decisiones acertadas frente a la incertidumbre de los datos y la poca información. Selecciona como método multicriterio el software ELECTRE que es uno de los modelos de clasificación superior más importantes utilizados para la aplicación en problemas MCDM de la vida real, ya que se basa en la construcción y explotación de una relación superior, mediante comparaciones por pares entre alternativas sobre los criterios de decisión,

producción de crudo pesado en el campo abarco. Tesis de pregrado. Bogotá: Fundación Universidad De América. p.42.

²⁰ NAVARRO, Op.cit., p. 16-18.

y a partir de ellas se obtiene un grado de dominancia o superación de una alternativa respecto de otra.

Este método utiliza el concepto de clasificación por comparaciones pareadas entre alternativas sobre los criterios apropiados, dice que una alternativa domina las otras si se cumplen uno o más criterios, en comparación con el criterio de otras alternativas y es igual al criterio restante, Navarro²¹, concluye que el método de selección ELECTRE puede ser usado en el desarrollo de diferentes proyectos que busquen la preselección de los mejores SLA, de acuerdo con una data estimada e incierta, incorporando la naturaleza difusa en la toma de decisiones, umbrales de indiferencia y preferencia. Y los resultados de la aplicación del método determinaron que los sistemas electrosumergible e hidráulico tipo jet lideran con una clara diferencia la relación de superioridad frente a las otras alternativas en cada uno de los tres casos evaluados; por ende, se establecieron como los sistemas preseleccionados de este estudio.

En la aplicación de métodos de selección multicriterio para determinar qué sistema de levantamiento artificial es el óptimo para determinado campo Carranza²², aplica el método matemático multicriterio TOPSIS que consiste en determinar la distancia Euclidiana más corta posible a una solución ideal y estar lo más lejos posible respecto a otra solución anti-ideal, cuando dichas alternativas son consideradas como vectores en un espacio n-dimensional.

Carranza²³, implemento este método multicriterio mediante una pequeña aplicación en Microsoft Excel, teniendo en cuenta el peso dado por los

²¹ NAVARRO, Op.cit., p. 65-72.

²² CARRANZA, Op. cit., p.15.

²³ CARRANZA, Op. cit., p.14-19

expertos para cada criterio y como base los Screenings realizados para cada uno de los métodos de levantamiento artificial, dando como resultado el sistema de levantamiento artificial más óptimo a utilizar en el campo receptor. El autor señala que los métodos de levantamiento artificial más empleados a nivel mundial son bombeo electrosumergible, bombeo mecánico, gas lift, bombeo hidráulico y bombeo por cavidades progresivas, haciéndose indispensable conocer los conceptos técnicos y de funcionamiento, así como ventajas, desventajas y aplicabilidad de cada sistema de levantamiento artificial para determinar el método más adecuado para un campo de estudio y de igual forma se requiere de la aplicación de una metodología que minimice el proceso de selección y que garantice el óptimo funcionamiento del sistema seleccionado.

De igual forma, Ehsan Fatahi, Hossein Jalalifar, Pyman Pourafshari y Babak Moradi²⁴, desarrollaron el artículo Selection of the Best Artificial Lift Method for One of the Iranian Oil Field Using Multiple Attribute Decision Making Methods, en donde usaron métodos de decisión multicriterio para seleccionar el mejor método de levantamiento artificial para un Campo en Irán. Gas lift es la mejor opción de acuerdo con los resultados de los modelos TOPSIS y ELECTRE. La probabilidad de selección del gas lift para este campo por el modelo TOPSIS se estima mayor que el modelo ELECTRE. La validación de esos métodos ha sido verificada y validada con exactitud en operaciones de varios Campos petroleros.

²⁴ EHSAN, Fatahi; HOSSEIN, Jalalifar; PYMAN, Pourafshari; BABAK, Moradi. Selection of the Best Artificial Lift Method in One of the Iranian Oil Field by the Employment of ELECTRE Model. {En línea}. {7 de mayo 2017}. Disponible en http://www.journalrepository.org/media/journals/BJAST_5/2011/Oct/1318834205-Jalaifer_2011BJAST585.pdf.

Así mismo, Fatahi Ensan, Jalalifar Hossein y Pourafshari Pyman ²⁵ seleccionaron en el artículo investigativo “Selection of the Best Artificial Lift Method in One of the Iranian Oil Field by the Employment of ELECTRE Model”, el mejor método de levantamiento artificial a partir del modelo de decisión multicriterio ELECTRA (Eliminación y opciones que reflejan la realidad) para el Campo Malekoh ubicado en Irán. Una vez analizados diversos parámetros mediante el método ELECTRA se concluyó que el mejor sistema de levantamiento artificial para dicho Campo es Gas Lift y bombeo hidráulico es la peor opción.

2.2 MARCO CONCEPTUAL

2.2.1 Métodos de decisión multicriterio. Los métodos de decisión multicriterio (MCDM) empezaron a experimentar un desarrollo importante desde la segunda mitad de la década de 1970, hasta convertirse en una herramienta científica que se utilizan para evaluar problemas y abordar el proceso de tomar decisiones con múltiples criterios.

Los problemas de MCDM suelen ser complejos, y se caracterizan porque diversos criterios contradictorios y las interacciones entre ellos deben modelarse explícitamente para comprender el problema o proporcionar una solución. Los MCDM como un campo multidisciplinario de investigación de operaciones, utiliza enfoques matemáticos que implican los siguientes pasos²⁶ ;

- Estructuración de procesos de decisión.
- Definir y seleccionar alternativas.

²⁵ EHSAN, Fatahi; HOSSEIN, Jalalifar; PYMAN, Pourafshari; BABAK, Moradi. Op. cit., p.45.

²⁶ AFSORDEGAN, Op. cit., p.22-29.

- Determinación de criterios y pesos.
- Aplicar juicios de valor y evaluar los resultados para tomar decisiones en el diseño o la selección de alternativas con respecto a múltiples criterios conflictivos.

En los MCDM, se distinguen tres tipos de problemas: elección, clasificación y ordenación. El objetivo del tomador de decisiones (DM) en cada tipo de problema es diferente²⁷ ;

- En los problemas de elección, el objetivo es ayudar al tomador de decisiones mediante la elección del subconjunto la "mejor" solución o alternativa. El resultado final es un procedimiento de elección o selección²⁸.
- El objetivo de clasificar los problemas es ayudar al tomador de decisiones a simplificar las acciones "más atractivas" en clases equivalentes. La clasificación consiste en ordenar un conjunto de soluciones²⁹.
- En los problemas de ordenación se desea saber qué alternativas pertenecen a cada clase de un conjunto predefinido de clases ordenadas. Los responsables de la toma de decisiones asignan cada acción a una categoría³⁰.

El proceso de decisión multicriterio se muestra en la figura 1, el cual incluye definir el problema como un objetivo, definir alternativas, desarrollar criterios, seleccionar indicadores y asignar pesos, construir una matriz de

²⁷ DOUMPOS, Michael; GRIGOROUDIS, Evangelios. Multicriteria decision aid and artificial intelligence: links, theory and applications. Hoboken: Editorial Wiley-Blackwell, 2013, p. 76.

²⁸ DAVOOD, Op. cit., p. 21.

²⁹ DAVOOD, Op. cit., p. 22.

³⁰ DAVOOD, Op. cit., p. 23.

evaluación, aplicando el método apropiado para evaluar alternativas, y finalmente, seleccionar alternativas de acuerdo con los tipos de problemas. Después las alternativas seleccionadas pueden ser implementadas y evaluadas en una aplicación particular³¹.

Para comprender como se lleva a cabo un proceso de este tipo, se deben definir algunos conceptos básicos en la literatura de los métodos de decisión multicriterio. A continuación, se describen los más importantes relacionados en este trabajo de grado.

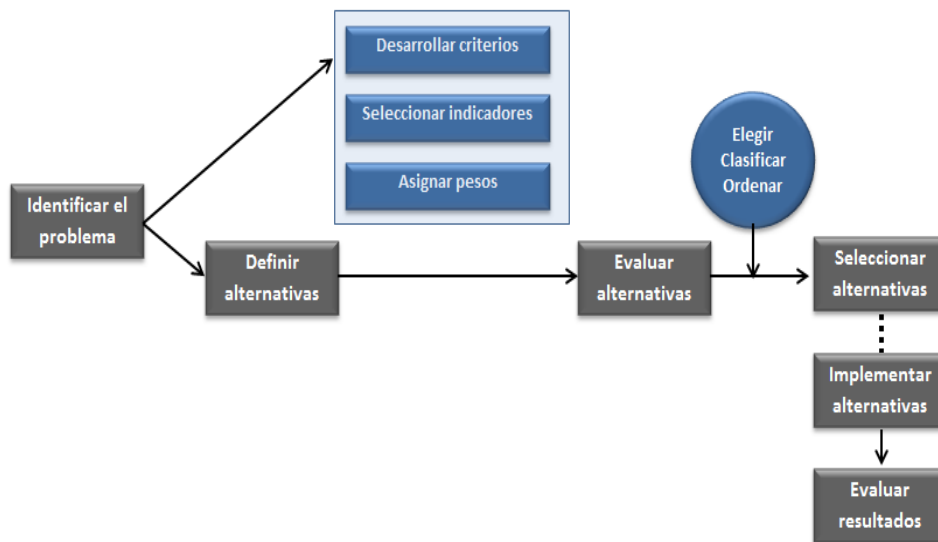
- **Alternativas:** También conocidas como acciones, opciones, estrategias o planes, son las posibles soluciones o un conjunto de posibles acciones para el problema de decisión. Se representan como $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$, A es el conjunto finito de alternativas y m el número de alternativas en a . A menudo ninguna de las alternativas se ajusta perfectamente a los objetivos. La alternativa que mejor se adapta a los objetivos se puede seleccionar evaluando las diferentes alternativas en función de un conjunto de criterios³².
- **Criterios:** También llamados atributos o factores claves, que se medirán para cada alternativa a fin de encontrar la solución. Los criterios son las herramientas para definir el atractivo de una alternativa. Por ejemplo, permiten comparar alternativas en términos de idoneidad en función de las necesidades de los decisores. Cada criterio corresponde a un punto de vista considerado en el proceso de decisión. Los criterios se presentan como: $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$, C es el conjunto finito de criterios y n

³¹ DAVOOD, Op. cit., p. 27.

³² DAVOOD, Sabaei. A review of multi-criteria decision-making methods for enhanced maintenance delivery, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://cyberleninka.org/article/n/876116.pdf>.

es el número de criterios en C . Cada $c_j(a)$ representa el valor de rendimiento de la alternativa $a \in A$ en criterio $c_j \in C$, en donde $j \in \{1, 2, 3, n\}$. Este valor de rendimiento puede ser en una escala ordinal que se representa en una escala numérica o verbal (lingüística) o en una escala cuantitativa. El orden de los valores no solo se da, sino que también hay una cantidad claramente definida de manera que da una medida de la brecha entre dos actuaciones .

Figura 1 Proceso de decisión multicriterio



Fuente: AFSORDEGAN, Arayeh. Contribution to multicriteria decision making in sustainable energy management based on Fuzzy and qualitative reasoning. Tesis Doctoral, Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2015. p. 27.

- **Pesos:** Determinan la importancia relativa de cada uno de los criterios con respecto al total y, de esta manera, realizar una ponderación de acuerdo al método empleado. Si bien algunas de las metodologías podrían no requerir ponderación de criterios (de hecho, algunas no requieren selección de criterios), en la mayoría de los casos es necesario hacerlo y se convierte en un proceso de gran importancia,

pues independientemente del método de selección, la ponderación de los criterios indiscutiblemente puede llegar a cambiar la escogencia, por su influencia directa sobre el resultado final. Los pesos son representados como $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ donde W es el conjunto finito de pesos³³. El rendimiento de la matriz M es construida por $A \times C$, donde $c_j(a)$ es el rendimiento en la fila a y columna j , ver figura 2³⁴.

Figura 2 Matriz

$$M = \begin{pmatrix} & \begin{array}{cccccc} c_1 & c_2 & c_3 & \dots & c_n \\ w_1 & w_2 & w_3 & \dots & w_n \end{array} \\ \begin{array}{c} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{array} & \begin{array}{cccccc} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \dots & a_{mn} \end{array} \end{pmatrix}$$

Fuente: AFSORDEGAN, Arayeh. Contribution to multicriteria decision making in sustainable energy management based on Fuzzy and qualitative reasoning. Tesis Doctoral, Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2015.p. 25

- **Decisor:** Es la persona o grupo de personas encargados de tomar una decisión, según sus propias preferencias expresadas con respecto a los objetivos a alcanzar y sopesando la importancia relativa de cada criterio³⁵.
- **Incertidumbre:** Los problemas de decisión a menudo implican un elemento de incertidumbre. Esto podría afectar una situación problemática de MCDM. Se puede referir al hecho de que los criterios,

³³ DAVOOD, Op. cit., p. 53.

³⁴ DAVOOD, Op. cit., p. 53.

³⁵ DAVOOD, Op. cit., p. 53.

las preferencias o la compensación no se pueden medir ni cuantificar con exactitud. Por lo tanto, este tipo de incertidumbre tiene un impacto en términos de las mediciones utilizadas³⁶.

Dado que los criterios que miden las alternativas a menudo entran en conflicto entre sí, es necesario determinar una compensación entre ellos. Es importante que estas compensaciones se cuantifiquen correctamente para corresponder a las preferencias del responsable de la toma de decisiones.

- **Métodos compensatorios:** estos métodos permiten la compensación entre los criterios, de modo que una mejora en un criterio puede contrarrestarse con una disminución del rendimiento en otro criterio³⁷.
- **Métodos no compensatorios:** en estos métodos no se permite ninguna compensación entre los criterios, por ejemplo, cuando el responsable de la toma de decisiones indica que los criterios son tan importantes que no puede considerarse el equilibrio entre ellos³⁸.
- **Métodos parcialmente compensatorios:** se puede aceptar alguna forma de compensación entre los criterios, y el principal problema es evaluar el grado de compensación entre los criterios³⁹.

³⁶ DAVOOD, Op. cit., p. 53.

³⁷ DAVOOD, Op. cit., p. 53.

³⁸ DAVOOD, Op. cit., p. 53.

³⁹ DAVOOD, Op. cit., p. 53.

2.2.2 Clasificación métodos de decisión multicriterio. Los MDMC se pueden clasificar en dos categorías principales: toma de decisiones de múltiples atributos (MADM) y toma de decisiones multiobjetivo (MODM). La principal distinción entre los dos grupos de métodos se basa en la determinación de alternativas. En la toma de decisiones multiobjetivo, las alternativas no están predeterminadas, sino que se optimiza un conjunto de funciones objetivas sujetas a un conjunto de restricciones. Se busca la solución más satisfactoria y eficiente. En la toma de decisiones de atributos múltiples, se debe evaluar un número de alternativas frente a un conjunto de atributos que a menudo son difíciles de cuantificar. La mejor alternativa generalmente se selecciona haciendo comparaciones entre alternativas con respecto a cada atributo⁴⁰. A continuación, la tabla muestra la comparación entre lo MADM y MOD, ver tabla1.

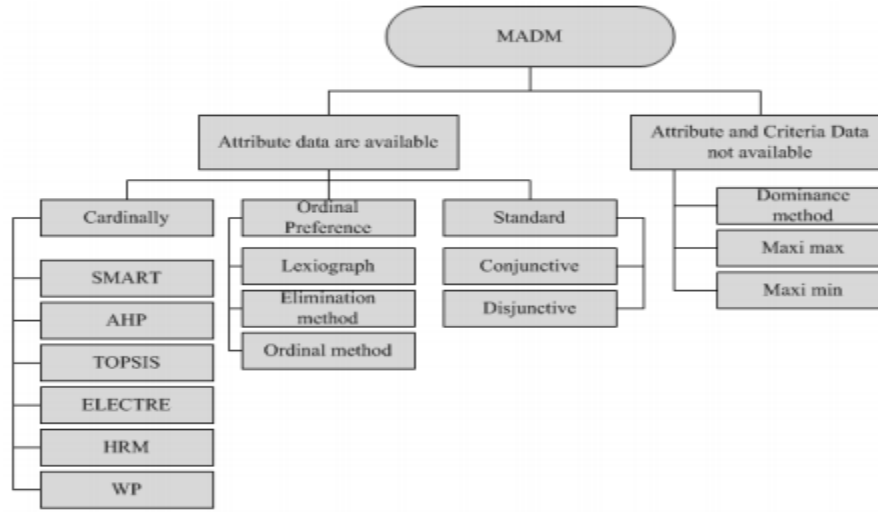
Tabla 1 Comparación MADM y MODM

DESCRIPCIÓN	MADM	MODM
Criterio	Atributos	Objetivos
Objetivo	Claro	No claro
Atributo	Claro	Implícito
Limitaciones	No claras	Claras
Opciones	Finitas/Claras	Infinita/ No claras
Interacción con decisores	Baja	Alta

Fuente: elaboración propia del proyecto (2020).

⁴⁰ POHEKAR, Sandesh; RAMACHANDRAN, Madhumitha. (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning-A review. En: Renewable and Sustainable Energy. Agosto, 2003, vol.8 no.4, p. 365–381.

Figura 3 Clasificación MADM



Fuente: DAVOOD, Sabaei. A review of multi-criteria decision-making methods for enhanced maintenance delivery, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://cyberleninka.org/article/n/876116.pdf>, p.32.

Teniendo en cuenta que se seleccionará el sistema de levantamiento artificial óptimo para un campo de estudio, los métodos considerados están dentro del grupo de toma de decisiones de múltiples atributos (MADM) y problemas de clasificación, porque el objetivo es tomar decisiones entre alternativas que se describen por varios atributos (criterios). En los problemas de clasificación, los decisores desean encontrar una estructura de orden de alternativas que depende de la importancia de cada criterio y la realización de alternativas en criterios particulares, ver figura 3⁴¹.

En muchos casos, estos procesos de decisión se basan en datos e información, que no están libres de subjetividad e imprecisión y deben gestionar la incertidumbre. La selección de las alternativas más adecuadas a partir de las obtenidas o consideradas, se pueden enfrentar como un

⁴¹ POHEKAR, Sandesh; RAMACHANDRAN, Madhumitha. Op. cit., p.90.

problema de MCDM, en el que cada alternativa se evalúa de acuerdo con un conjunto de criterios⁴².

En general, existen dos entidades principales de investigación en donde los MDMC fueron inicialmente desarrollados, la escuela americana, la cual es más descriptiva a los métodos MAUT, AHP, y TOPSIS y la escuela francesa, que ha desarrollado métodos más constructivistas como ELECTRE y PROMETHEE⁴³.

Tradicionalmente los MDMC son divididos en tres grupos principales: métodos de decisión de valores, métodos de aspiración de objetivos y nivel de referencia y métodos de sobre clasificación, los cuales fueron clasificados de esta manera por Belton and Stewart (2002). De igual forma, los MDMC pueden ser clasificados en otras cuatro categorías acorde a Guitouni y Martel (1998) como métodos elementarios, enfoque de criterio de síntesis único, enfoque de síntesis de rango y métodos mezclados⁴⁴.

Según Roy Y Słowiński⁴⁵ los métodos multicriterio existentes de acuerdo a su enfoque y tienen en cuenta varios aspectos del proceso de decisión y de la cooperación entre el analista y el tomador de decisiones como se observa en la siguiente tabla.

⁴² AFSORDEGAN, Op. cit., p.24.

⁴³ AFSORDEGAN, Op. cit., p.24.

⁴⁴ AFSORDEGAN, Op. cit., p. 27.

⁴⁵ ROY, Bernard; SŁOWIŃSKI, Roman. Questions guiding the choice of a multicriteria decision aiding method. En: EURO Journal on Decision Processes. Abril-mayo, 2013, vol. 1 no.2, p. 69-97.

2.2.3 Estado del arte de los métodos de selección multicriterio aplicables a la selección de métodos de levantamiento artificial. A continuación se presenta una revisión bibliográfica sobre el estado del arte de los métodos de selección multicriterio aplicables a la selección de métodos de levantamiento artificial, ver tabla 2.

Tabla 2 Métodos multicriterio existentes

Clasificación	Abreviatura	Método
Métodos basados en la teoría del valor	AHP	Proceso Analítico Jerárquico
	ANP	Proceso de Red Analítica
	COPRAS	Evaluación Compleja Proporcional
	TOPSIS	Técnica para el orden de preferencia por similitud a solución ideal
	VIKOR	Optimización Multidisciplinar y Solución de Compromiso
	UTA	Utilidades Aditivas
	MCS	Simulación Monte Carlo
	UT	Teoría de la Utilidad
	GST	Teoría del sistema Gris
	MAUT	Teoría de la utilidad multiatributo
	MAVT	Teoría del valor multiatributo
Métodos de clasificación	PROMETHEE	Clasificación de Preferencia, Método de enriquecimiento de Evaluaciones
	ELECTRE	Eliminación y Opciones que reflejan la realidad
	UTA GMS	La regresión ordinal robusta para problemas de clasificación y elección
	GRIP	Regresión Generalizada con Intensidades de Preferencia
	RUTA	Método de desagregación de preferencia

Fuente: ROY, Bernard; SŁOWIŃSKI, Roman. Questions guiding the choice of a multicriteria decision aiding method. En: EURO Journal on Decision Processes. Abril-mayo, 2013, vol. 1 no.2, p. 69-97.

Los modelos MCDM (Multi Criteria Decision Making) permiten la toma de decisiones en presencia de múltiples criterios, normalmente opuestos. Las complicaciones de los MCDM se pueden clasificar en general en dos clases: toma de decisiones de atributos múltiples (MADM) y toma de decisiones objetivas múltiples (MODM), dependiendo de si el problema es

de selección o diseño⁴⁶. Algunos métodos son; SAW (Simple Additive Weighting), TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), ELECTRE (Elimination Et Choix Traduisant la Réalité), WPM (Weighted Product Model), VIKOR (VIšekriterijumsko KOmpromisno Rangiranje), compromise-ranking model, AHP (Analytic Hierarchy Process).

2.2.3.1 Método TOPSIS. Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), método creado y desarrollado por Hwang y Yoon en 1981, se basa en el concepto de que la opción elegida debe tener la distancia euclidiana más corta de la solución ideal y la más lejana de la solución ideal negativa⁴⁷.

La solución ideal es hipotética, para la cual todas las alternativas relativas a los valores de atributo de criterio (V) corresponden a los valores máximos de atributo en la base de datos que comprende las soluciones satisfactorias. La solución ideal negativa es la solución hipotética para la cual las alternativas relativas a los valores de los atributos de los criterios (V_{ii}), corresponden a los valores mínimos de los atributos en la base de datos. TOPSIS brinda una solución que no solo está más cerca de la mejor hipotéticamente, sino también más alejada de la alternativa hipotéticamente peor⁴⁶.

Este método se basa en que es deseable que una determinada alternativa se ubique a la distancia más corta respecto de una solución ideal positiva y a la mayor distancia respecto a una solución ideal

⁴⁶ FATAHI, Ehsan. Selection of the Best Artificial Lift Method in One of the Iranian Oil Field by the Employment of ELECTRE Model. En: British Journal of Applied Science and Technology, enero- marzo, 2011, vol. 1 no.4, p.172–180.

⁴⁷ HWANG, Ching-Lai; YOON, Kwangsun. Multiple attribute decision making Methods and Applications. New York: Springer Verlag, 1981.

negativa. En este método una solución ideal se define como un conjunto de niveles (o puntuaciones) ideal respecto a todos los atributos considerados de un determinado problema, aun cuando la solución ideal usualmente sea imposible o no sea factible de obtener⁴⁷.

Desde este punto de vista la racionalidad de la conducta humana radica en encontrarse lo más cerca posible de la solución ideal y en alejarse lo más posible de una solución anti-ideal o ideal negativa. En el método TOPSIS se detalla un índice llamado similaridad o proximidad relativa combinando los valores de la proximidad a la solución ideal positiva y la lejanía respecto a la solución ideal negativa. La idea es seleccionar la alternativa que tenga la máxima similaridad con respecto a la solución ideal positiva⁴⁶.

A pesar de todo esto, TOPSIS presenta ciertos inconvenientes. Uno de ellos es el fenómeno del orden, en este fenómeno el orden de las alternativas cambia cuando una alternativa es añadida o eliminada del problema de decisión. En algunos casos, podría llegar a darse el orden inverso total, donde el orden de las preferencias es invertido totalmente, es decir, que la alternativa que se consideraba la mejor, con la inclusión o la eliminación de alguna alternativa, se convierte en la peor. Este fenómeno, en la mayoría de los casos, no es aceptable. Wang y Luo ya estudiaron el orden inverso en TOPSIS (Wang y Luo, 2009), pero no aportaron ninguna solución al respecto⁴⁸.

Los principales fundamentos del orden inverso en TOPSIS son debidas al cálculo de la norma y a la elección de la solución ideal positiva y la solución ideal negativa. TOPSIS contempla las sutilezas que el concepto de ideal tiene y se construye un método operativo;

⁴⁸ *Ibíd.*, 23p.

La solución ideal y anti-ideal, son soluciones artificiales. En este sentido, la solución ideal contiene a todos los valores de los criterios que pertenecen a los valores óptimos de las alternativas; la solución anti-ideal agrupa a todos los valores de los criterios que conciernen a los valores menos deseados de cada criterio de la calificación de las alternativas⁴⁹.

2.2.3.2 Método ELECTRE. ELECTRE (Elimination and choice translating algorithm) es uno de los métodos más usados en la última década, fue propuesto por Bernard Roy en 1965 siendo de los modelos de clasificación superior más importantes utilizado para la aplicación en problemas MCDM, Se basa en la construcción y aplicación de una relación superior, mediante comparaciones en pares, entre alternativas sobre los criterios de decisión y a partir de ellas se obtiene un grado de dominancia o ventaja de una opción respecto de otra⁴⁹.

El método ELECTRE maneja el concepto de clasificación por comparaciones igualadas entre opciones sobre los criterios apropiados. Una opción domina las otras si se cumplen uno o más criterios en comparación con el criterio de otras alternativas y es igual al criterio restante⁵⁰

El procedimiento de ELECTRE permite reducir el tamaño del conjunto de soluciones eficientes mediante una participación del conjunto eficiente en dos subconjuntos. Uno de alternativas muy favorables para el decisor y otro de alternativas menos favorables. En relación con el procedimiento,

⁴⁹ *Ibíd.* 30p.

⁵⁰ ALEMI, Mehرداد; JALALIFAR, Hossein; KAMALI, Gholam; KALBASI, Mansou. A mathematical estimation for artificial lift systems selection based on ELECTRE model. En: Journal of Petroleum Science and Engineering, Abril-mayo, 2011, vol.78 no. 1, p. 193–200.

partiendo de una matriz de decisión, se utiliza la relación de sobre clasificación con el fin de obtener una matriz de superación. Una alternativa sobre califica a otra y pasa a formar parte de un conjunto de alternativas más favorable cuando es al menos igual de buena, teniendo en cuenta el conjunto de atributos considerados. Para ello, es necesario que la concordancia entre ambas supere un índice y la discordancia no supere otro, ambos establecidos previamente.

2.2.3.3 Método AHP. El proceso analítico jerárquico (por sus siglas por Analytic Hierarchy Process) es una técnica de decisión multicriterio, que basada en escalas de razón, permite la resolución de problemas complejos, caracterizados por la existencia de múltiples escenarios, actores y criterios (tangibles e intangibles) y por lo cual está basado en el principio de que la experiencia y el conocimiento de los actores son tan importantes como los datos mismo utilizados en el proceso.

Este proceso se basa en que los elementos que afectan la decisión (es decir los criterios utilizados para tomar las decisiones y las alternativas de selección), son representados en niveles, el nivel más bajo comprende las alternativas de selección. Una vez se construye la jerarquía el procedimiento consiste en priorizar, es decir en dar una importancia relativa a cada elemento en cada nivel de dicha jerarquía.

Este método fue elaborado por Thomas Saaty en 1972, el cual muestra un proceso analítico jerárquico directamente con pares ordenados de prioridades de importancia, preferencia o probabilidad de pares de elementos en función de un atributo o criterio común representado en la jerarquía de decisión. Se fundamenta en la construcción de un modelo escalonado, de manera eficiente y gráfica, que establece la información

respecto a un problema, dividiéndola y ordenándola por partes, para representar los efectos de cambios en los niveles y poder así simplificar⁵¹. En cada nivel del escalonamiento se realizan cotejos entre pares de elementos de ese nivel, teniendo en cuenta la importancia o contribución de cada uno de ellos al elemento del nivel superior al que están ligados, cuando el grupo consiste en expertos, cada uno elabora su propia jerarquía y el AHP combina los resultados por el promedio geométrico⁵⁰.

Para el desarrollo del método, se establecen las prioridades entre alternativas y criterios, se asume que se tienen n acciones independientes y diferentes, el decisor está en la capacidad de realizar comparaciones binarias entre las diferentes acciones, la cuantificación de los juicios entregados por el decisor en pares de acciones (A_i, A_j) se representa en una matriz recíproca $n \times n$ ⁵⁰.

2.2.3.4 Método por matriz de evaluación tecnológica (MET). El método (MET) se basó en el proyecto original de gestión tecnológica de Pugh Roberts Associates y en las actividades de un grupo de PDVSA aconsejados por la empresa SRI Internacional, para el desarrollo de un área de proyectos tecnológicos según Gómez⁵².

Las técnicas de evaluación por opciones tecnológicas realizada por PDVSA se desarrolló a partir de criterios que miden las particularidades cualitativas y cuantitativas, permitiendo la evaluación y jerarquización de manera sistemática y objetiva, dentro de cualquier oportunidad tecnológica en las áreas de explotación, producción y cualquier otra relacionada a la

⁵¹ SAATY, Thomas. The Analytic Network Process. Pittsburgh: RSW Publications, 1996.

⁵² GÓMEZ, Manuel. Evaluación y análisis comparativo de diferentes métodos de selección de sistemas de levantamiento artificial. Tesis de Magíster en Ciencias. Caracas: Universidad Central de Venezuela, 2005.

industria⁵¹. El método por matriz de evaluación tecnológica tiene seis (6) etapas:

1. Adaptación metodológica.
2. Selección y ponderación de criterios generales.
3. Definición y selección de criterios específicos.
4. Ponderación de criterios generales.
5. Evaluación y jerarquización de opciones tecnológicas.
6. Ponderación de criterios específicos⁵¹.

2.2.3.5 Método VIKOR. El método Multi-criteria optimization and compromise solution (VIKOR en Serbio) desarrollado por Serafín Opricovic en 1990, es una herramienta efectiva en situaciones donde el responsable de la toma de decisiones no puede o no sabe expresar sus preferencias hacia las alternativas. La solución de compromiso obtenida podría ser aceptada por el tomador de decisiones porque proporciona una utilidad máxima de grupo y un arrepentimiento individual mínimo⁵³. La aplicación de VIKOR implica:

Una solución compromiso es aceptable para la resolución de conflictos. El responsable de la toma de decisiones está dispuesto a aprobar la solución más cercana al ideal. Existe una relación lineal entre cada función de criterio y la utilidad de un decisor. Los criterios son conflictivos y no conmensurables (unidades diferentes). Las alternativas se evalúan según todos los criterios establecidos (matriz de rendimiento). La preferencia del tomador de decisiones se expresa mediante pesos, dados o simulados. El

⁵³ BERNAL, Sergio; NIÑO, Daniel. Modelo multicriterio aplicado a la toma de decisiones representables en diagramas de Ishikawa. Tesis de pregrado. Bogotá: Universidad Distrital Francisco de Paula Santander, 2018, 40p.

método se puede iniciar sin participación interactiva de tomador de decisiones, pero este es el encargado de aprobar la solución final y se debe incluir su preferencia. La solución de compromiso propuesta (uno o más) tiene una tasa de ventaja. Un análisis de estabilidad determina los intervalos de estabilidad de peso⁵².

El método VIKOR es un instrumento práctico en escenarios en el cual el responsable de la toma de decisiones no puede o no sabe expresar sus predilecciones hacia las opciones., el medio de obligación derivada podría ser aprobada por el decisor porque suministra un beneficio máximo de conjunto (representado por la alternativa con el min S) y un arrepentimiento individual mínimo (representado por la alternativa con el min R)⁵². En la figura 4 se puede observar un diagrama sobre el proceso del método.

2.2.3.6 Método COPRAS. COPRAS (por sus siglas en ingles Complex Proporcional Assessment of alternatives) es un método en el cual la asignación de pesos se realiza por expertos, evaluando los criterios que se deban maximizar con los que se deban minimizar, así; elige las opciones dominantes de decisión considerando las soluciones ideales y las peores-ideales, mediante la clasificación y evaluación paso a paso de las opciones en términos de su importancia y grado de utilidad⁵³.

Los criterios expresados en términos de intervalos de tiempo, está fundamentada en escenarios reales de la toma de decisiones y en aplicar la teoría de sistemas grises. COPRAS usa un paso a paso y un procedimiento de evaluación de las opciones en términos de su significado y el grado de utilidad⁵⁴.

⁵⁴ ZAVADSKAS, Edmundas; TURSKIS, Zenonas; TAMOSAITIENE, Jolanta, VALERIJA, Marina. Multicriteria selection of project managers by applying grey criteria. En:

Este método pertenece a la subclasificación de los métodos de puntuación directa que son las más simples, basadas en la evaluación de diferentes opciones mediante operaciones aritméticas básicas. COPRAS evalúa las alternativas sumando el valor normalizado de cada criterio por su peso correspondiente. SAW es más antiguo y permite realizar este proceso únicamente cuando se desea maximizar un criterio. COPRAS constituye una evolución de SAW y se aplica tanto para criterios que se desean maximizar como minimizar⁵⁴. Pasó a paso del método COPRAS;

1. Seleccionar el conjunto de los más importantes Criterios t , que describen las alternativas.
2. Construyendo la matriz de toma de decisiones
3. Determinación de significancias f de los criterios q i .
4. Normalizar la matriz de toma de decisiones.
5. Cálculo de la matriz de decisión normalizada pondera.
6. Calcular las sumas P del criterio valores, cuyo valor grande es preferible.
7. Cálculo las sumas R j del criterio valores.
8. Cálculo las sumas R j del criterio valores.
9. Cálculo de la relación significado s de cada alternativa.
10. Determinación del criterio de optimización K de la fórmula.
11. Determinar el orden de prioridad de las alternativas.
12. Cálculo del grado de utilidad de cada alternativa⁵⁵

Technological and Economic Development of Economy, abril-mayo, 2008, vol. 14 no.4, p. 462-477.

⁵⁵ *Ibíd.*, p.469.

2.2.3.7 Método PROMETHEE. PROMETHEE (Método de Organización de Clasificación de Preferencias para Evaluaciones de Enriquecimiento) fue desarrollado por Jean-Pierre Brans y presentado por primera vez en 1982. El método Posee las siguientes características⁵⁶;

Considera e integra en cada criterio un concepto básico de relación de graduación difusa mediante medidas de comparación por pares para alternativas a diferentes grados de relación entre sí. Estos diferentes grados de relación se usan luego para configurar un pre orden parcial (PROMETHEE I), y/o un pre orden completo (PROMETHEE II). Como las evaluaciones de cada criterio se expresan en sus propias unidades, los efectos de escalado se eliminan por completo. No es aceptable obtener conclusiones según las escalas en las que se expresan las evaluaciones ⁵⁵.

PROMETHEE minimiza al máximo el número de incomparabilidades cuando para un procedimiento específico, todas las incomparabilidades son sistemáticamente retiradas, la información suministrada puede ser más debatible. El método PROMETHEE evade los procedimientos de caja negra al incluir solamente parámetros técnicos que tienen significado para el que toma las decisiones. El método suministra información sobre la naturaleza conflictiva de los criterios y ofrece herramientas de sensibilidad para probar fácilmente diferentes conjuntos de pesos. PROMETHEE permite crear criterios cualitativos con diferentes valores semánticos y es el propio tomador de decisiones, quien debe asignar valores numéricos a cada valor semántico. Esto es claramente un vacío significativo que crea un alto grado de incertidumbre⁵⁷.

⁵⁶ *Ibíd.*, p.41.

⁵⁷ *Ibíd.*, p.42.

La Decisión Lab es de las implementaciones más actuales de las metodologías PROMETHEE y GAIA. Ha sido desarrollado por la compañía canadiense Visual Decisión en cooperación con Jean-Pierre Brans y Bertrand Mareschal y sustituye al software PromCalc que anteriormente habían desarrollado este últimos. En 1988 se estableció el módulo interactivo visual GAIA que facilita una representación gráfica de apoyo a los métodos PROMETHEE. La grafía en GAIA no deja de ser, en cierta medida, un indagador de inconsistencias que al actualizarse en tiempo real, puede convertirse en un sistema de análisis de la robustez y la sensibilidad. Los criterios generales se especifican a partir de la determinación de los siguientes parámetros⁵⁸;

1. que es un umbral de indiferencia. Es el mayor valor de desvío entre los atributos de dos alternativas con respecto a un criterio por debajo del cual el que toma las decisiones considera que hay indiferencia.
2. es un umbral de preferencia estricto. Es el valor más bajo de desvío entre los atributos de dos alternativas con respecto a un criterio por encima del cual el que toma las decisiones considera que hay una preferencia estricta.
3. es un parámetro directamente relacionado con la desviación estándar de una distribución normal⁵⁷.

2.2.3.8 Método axiomático de Arrow-Raynaud. Arrow y Raynaud (1986) indican que la mayoría de los métodos multicriterio discretos carecen de una base axiomática apropiada y por tal motivo, estos pueden llevar al desarrollo de clasificaciones de alternativas que resulten arbitrarias y no coherentes⁵⁹;

⁵⁸ *Ibíd.*, p.43.

⁵⁹ ARROW, Kenneth; RAYNAUD, Herve. *Social Choice and Multicriterion Decision-Making*. Cambridge: The MIT Press, 1986.

Con el fin de solucionar esta cuestión, Arrow y Raynaud (1986) vinculan los problemas de elección multicriterio discretos con la Teoría de la Elección Social, cuyo origen se remonta al libro Elección social y valores individuales [Arrow (1951)]. Esta teoría se ocupa del estudio formal de procedimientos mediante los que una sociedad decide entre opciones alternativas en base a las preferencias de sus miembros [Barberá (1977)]. Arrow y Raynaud explican que, considerando cada criterio como un agente social, la correlación entre dichos problemas y la elección social es perfecta⁶⁰.

Para el desarrollo de esta técnica, se establecieron ciertas condiciones o propiedades denominado axiomas vinculados a la teoría mencionada anteriormente;

Estos axiomas, que habían sido desarrollados en parte años antes por Köler (1978), pueden resumirse y simplificarse en tres puntos según Munda (2008). El primero se basa en que las alternativas son clasificadas a través de un proceso gradual, el segundo explica que en cada etapa, la información utilizada se refiere únicamente a alternativas no clasificadas hasta dicho momento y el tercero se denomina Axioma de prudencia [Arrow y Raynaud (1986)] el cual, según Sabio, Mateos y Jiménez (2012) basa su idea principal en que no es prudente aceptar alternativas cuyo grado de conflicto sea alto y en consecuencia, puedan dar lugar a decisiones vulnerables. En relación con el axioma anterior, según Romero (1993) debido a su carácter difuso y a su complejidad matemática ha generado un gran debate. Varios autores como por ejemplo Saaty (2006) lo discuten⁵⁹.

El primer paso para realizar este método está en identificar el elemento máximo de cada fila de la matriz, seguido a esto se elige el más pequeño

⁶⁰ CABELLO, Op. cit., p.11.

de los máximos seleccionados, si se obtienen dos elementos del mismo valor, se elige uno de forma aleatoria. La alternativa lograda pasa a ocupar la última posición en la escala de clasificación⁵⁹.

2.2.3.9 Método GRIP. Regresión Generalizada con Intensidades de Preferencia (GRIP) es el método GRIP que en esencia construye un conjunto de funciones de valor aditivos compatibles con información de preferencia compuesto por un pre orden parcial y requiere las intensidades de preferencia en un subconjunto de acciones, denominadas acciones de referencia⁶¹. Se cimienta no solo la correspondencia de predilección en el calificado conjunto de operaciones, asimismo la información sobre las fuerzas de distinción por pares de tareas de ese conjunto por decisor.

Este método utiliza una función de valor aditivo general para representar preferencias e identifica un espacio factible de funciones de valor y cualquier función aditiva perteneciente a ese conjunto se llama compatible función de valor ⁶⁰.

GRIP generaliza los métodos UTA y UTAGMS adoptando todas las características de UTAGMS y tomando en cuenta información adicional de preferencia en forma de comparaciones de intensidades de preferencia entre algunos pares de acciones de referencia. Para las acciones $x, y, w, z \in A$, estas comparaciones se expresan de dos formas posibles (no exclusivo):

⁶¹ FIGUEIRA, Jose; GRECO, Salvatore; ROMAN, Slowinski. Building a set of additive value functions representing a reference preorder and intensities of preference: GRIP method. En: European Journal of Operational Research, 2009, vol. 195 no.2, p.460-486.

- 1) De manera integral, en todos los criterios, como "se prefiere x a y al menos tanto como se prefiere w a z".
- 2) Parcialmente, en cada criterio, como "se prefiere x a y al menos tanto como se prefiere w a z, en criterio $g_i \in F$ "⁶⁰.

2.2.3.10 Método UTA. La regresión ordinal robusta para problemas de clasificación y elección (UTA GMS) consiste en considerar todo el conjunto de funciones de valor relacionados para hacer frente a los inconvenientes de categorización y de elección. El método se constituye por tres pasos se inicia con el proceso de obtención de preferencias, conduce a través de la declaración de los problemas de regresión ordinal adecuados y se calculan las relaciones binarias en el conjunto de todas las alternativas⁶².

Las características principales de UTA GMS son; posibilidad de tratar con una función de valor aditivo general donde un espacio factible de funciones de valor es identificado y cualquier función aditiva perteneciente a ese conjunto se denomina función de valor compatible, la información de preferencia se puede proporcionar como un pedido parcial previo en el conjunto de acciones de referencia, consideración de la estabilidad de las preferencias en dos relaciones de preferencias, necesarias y posibles, se considera que tiene en cuenta ciertas preferencias concebibles, representación de incomparabilidad entre acciones porque la preferencia necesaria no está completa en general, permite conclusiones sólidas donde las relaciones de preferencia necesarias y posibles se basan en todos los compatibles funciones de valor en lugar de solo una entre las muchas funciones posibles como es habitual en MCDA, interacción con el decisor que puede modificar la información de preferencia verificando su impacto

⁶² GRECO, Salvatore; KADZIŃSKI, Milosz; MOUSSEAU, Vincent; SŁOWIŃSKI, Roman. Robust ordinal regression for multiple criteria group decision: UTAGMS-GROUP and UTADISGMS-GROUP. En: Decision Support Systems, 2012, vol. 52 no.3, p.549-561.

sobre las relaciones de preferencia en el conjunto de acciones consideradas⁶¹.

2.2.3.11 Método RUTA. RUTA es un método de disociación de particularidad, que deduce un conjunto de funciones agregadas de valor de la información de predilección en referencia a las hileras esperadas de cualesquiera opciones de referencia. La práctica muestra que los individuos describen dando alto valor a la gama de categorías permitidas que una alternativa en específica debe conseguir o a limitaciones en los resultados conclusivos de las alternativas. Cabe indicar que RUTA puede considerarse como una generalización del método original UTA⁶³

2.2.3.12 Óptimo de Pareto. El concepto de óptimo de Pareto o el concepto de solución está basado en el criterio de optimalidad paretiana, enunciado por Pareto en 1896 como “Una alternativa es eficiente (o Pareto óptima) si toda alternativa que proporcione una mejora en un atributo produce un empeoramiento en al menos otro de los atributos”⁶⁴.

De esta definición, se deriva la alternativa dominada o no eficiente, como una alternativa para la que existe otra alternativa con todos los atributos mejores. Así se define el conjunto eficiente o de Pareto o también llamada frontera de Pareto, por su representación en el caso continuo como parte

⁶³ KADZIŃSKI, Milosz; GRECO, Salvatore SŁOWIŃSKI, Roman. RUTA: A framework for assessing and selecting additive value functions on the basis of rank related requirements. En: Omega International Journal of Management Science, 2019, vol.41 no. 4, p.735-751.

⁶⁴ BEGOÑA, Vitoriano. Teoría de la decisión: decisión con incertidumbre, decisión multicriterio y teoría de juegos. Tesis Doctorado. Madrid: Universidad Complutense de Madrid, 2007. p. 20.

de la frontera del espacio de objetivos o resultados, para atributos numéricos con objetivos de maximización como⁶⁵ ;

$$\varepsilon = \left\{ x \in F: \exists x' \in F \mid z_k(x') \geq z_k(x) \forall k \text{ y } z_t(x') > z_t(x) \text{ para al menos un } t \in \{1, \dots, p\} \right\}^{70}$$

Es así que una solución puede ser óptima bajo un criterio, pero no bajo otro, es decir una solución es un óptimo de Pareto si una mejora en uno de los criterios siempre supone un empeoramiento en alguno de los demás, se llaman también soluciones eficientes o no dominadas.

Bonet ⁶⁶ aplicó la ley de Pareto, un concepto de las ciencias económicas a la ingeniería al aplicar la metodología de La Fiabilidad en un parque de máquinas que trabajaba previamente con datos estadísticos para garantizar el funcionamiento de la empresa y el nivel de producción requerido. Diseñó la metodología porque en los sistemas usados se desperdiciaba tiempo en la realización de los cálculos de piezas no críticas, solicitar los módulos de piezas de repuesto, también se desperdiciaba dinero en piezas que en la mayoría de los casos iban a engrosar el inventario de piezas no vendidas, provocando así gastos innecesarios que podían alcanzar sumas considerables para la empresa.

La Ley de Pareto vino a solucionar esta problemática al poder ser aplicada como herramienta para determinar las piezas críticas y determinar a cuáles piezas y sistemas de la empresa hay que prestarle más atención y por lo

⁶⁵ BEGOÑA, Op.cit, p.20.

⁶⁶ BONET, Carlos. Ley de Pareto aplicada a la fiabilidad. En: Ingeniería Mecánica, septiembre-diciembre, 2005, vol. 8, no. 3, p. 1-9.

tanto dedicarle los recursos financieros, materiales y humanos. La Ley de Pareto es una herramienta de calidad y plantea que en cualquier negocio o industria pocos elementos son vitales, mientras que la gran mayoría no lo son, también se conoce como Ley 20 – 80 donde el 20% de la población es la que provoca el 80 % de los problemas, hay que buscar el 20% de los rubros que más influyen o quienes provocan el 80% de los problemas⁶⁶.

La forma que se decida para determinar la clase de los rubros o variables se incluyen en la metodología, es una decisión del especialista. Por ejemplo, si se toma el 20% de los rubros, puede ser que el porcentaje acumulado no sea representativo y lo mejor sería tomar a partir del 80% del valor acumulado⁶⁶.

Para este proyecto de investigación se definió el óptimo de Pareto aplicable a la metodología, por la posibilidad que le brinda al ingeniero según su experiencia de determinar el valor de las variables a incluir en el método de selección multicriterio y así generar los valores porcentuales según los criterios establecidos de relevancia para identificar el sistema de levantamiento artificial óptimo para un campo de estudio.

Es así que la ley de óptimo de Pareto es propicia para el método propuesto, ya que considera que en cualquier sistema un equilibrio completo no es posible pero que al contemplar una serie de variables basadas en la experiencia es posible generar una solución adecuada al problema de investigación propuesto.

Tabla 3 Resumen de estado del arte

Métodos	Principio	Ventajas	Desventajas
Método TOPSIS	Valoración basada en el método compensatorio, mide las distancias de las alternativas desde la solución ideal.	Usa # difusos por la incertidumbre Consideración de Soluciones ideales positivos y negativos.	Se requiere normalización en problemas multidimensionales.
Método ELECTRE.	Usa el método de clasificación de rango superior, comparación pareada y compensatoria.	Se aplica aun cuando falta información Compara alternativas incomparables Se usa para atributos cuantitativos y cualitativos.	Demanda tiempo, si no se usa un software.
Método AHP	Uso de estructura jerárquica, basado en enfoque de valoración, compensación y Comparación.	Índice de Inconsistencia criterios cualitativos y cuantitativos.	Demanda mucho tiempo, se requiere Normalización.
Método por matriz de evaluación tecnológica (MET)	Técnica de evaluación por opciones tecnológicas a partir de criterios que miden las particularidades cualitativas y cuantitativas, permitiendo la evaluación y jerarquización de manera sistemática.	Rapidez y confiabilidad.	Requiere de equipos tecnológicos y de software específico.
Método VIKOR	Definir primero las soluciones ideales positivas y negativas. La solución ideal positiva indica la alternativa con el valor más alto (puntuación de 100) mientras que la solución ideal negativa indica la alternativa con el valor más bajo (puntuación de 0).	Es una herramienta efectiva en situaciones donde el responsable de la toma de decisiones no puede o no sabe expresar sus preferencias hacia las alternativas.	Se propone como una solución compromiso, a la alternativa mejor clasificada por la medida Qj, si se cumplen la condición de ventaja aceptable y la condición de estabilidad aceptable en la toma de decisiones. Si alguna de estas condiciones no se satisface debe proponerse un conjunto de soluciones compromiso.

Fuente: elaboración propia del proyecto (2020).

Continuación (Tabla 3)

Método COPRAS	Selecciona las mejores alternativas de decisión considerando las soluciones ideales y las peores-ideales, en una clasificación y evaluación paso a paso de las alternativas en términos de su importancia y grado de utilidad.	Elige las opciones dominantes de decisión considerando las soluciones ideales y las peores-ideales, mediante la clasificación y evaluación paso a paso de las opciones en términos de su importancia y grado de utilidad.	Es un método en el cual la asignación de pesos se realiza por expertos y la situación debe ser muy específica, de tal forma que no es fácil de ser replicable.
Método PROMETHEE	Usan el método de clasificación de rango superior, comparación pareada y compensatorio Genera clasificación en relación con los pesos de la decisión	Se aplica aún cuando falta información.	Demanda tiempo, si no se usa un software No se desempeña bien cuando hay muchos criterios.
Método axiomático de Arrow-Raynaud	Una sociedad decide entre opciones alternativas basándose en las preferencias de sus miembros.	Las alternativas son clasificadas a través de un proceso gradual.	La información utilizada se refiere únicamente a alternativas no clasificadas hasta dicho momento, por ende no es fácil de replicar.
Método GRIP	Construye un conjunto de funciones de valor aditivos compatibles con información de preferencia compuesto por un pre orden parcial y requiere las intensidades de preferencia en un subconjunto de acciones.	Este método tiene una función de valor aditivo general para representar preferencias e identifica un espacio factible de funciones de valor.	Requiere de mayor cantidad de datos.
Método UTA	Considera todo el conjunto de funciones de valor relacionados para hacer frente a los inconvenientes de categorización y de elección.	Posibilidad de tratar con una función de valor aditivo general donde un espacio factible de funciones de valor es identificado y cualquier función aditiva perteneciente a ese conjunto.	Las relaciones de preferencia necesarias y posibles se basan en todos las compatibles funciones de valor en lugar de solo una entre las muchas funciones posibles como es habitual en MCDA.

Fuente: elaboración propia del proyecto (2020).

Continuación (Tabla 3)

Método RUTA	Deduce un conjunto de funciones agregadas de valor de la información de predilección en referencia a las hileras esperadas de cualesquiera opciones de referencia	Se le da alto valor a la gama de categorías permitidas que una alternativa en específica debe conseguir.	Requiere de mayor cantidad de datos.
Óptimo de Pareto	Una alternativa es eficiente (o Pareto óptima) si toda alternativa que proporcione una mejora en un atributo produce un empeoramiento en al menos otro de los atributos	Es aplicable a un sin número de alternativas, de áreas, de industrias.	La alternativa es cuantificable solo si un atributo produce un empeoramiento en al menos otro de los atributos. Es una condición para ser aplicado.

Fuente: elaboración propia del proyecto (2020).

2.3 SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL

Para Badran⁶⁷ “un Sistema de Levantamiento Artificial (SLA), es un mecanismo externo a la formación productora encargado de levantar crudo desde la formación a una determinada tasa”, dependiendo del nivel de energía del pozo.

Los estudios realizados en la ingeniería de producción comprenden una serie de procesos que van desde el comportamiento de afluencia, el levantamiento de los fluidos del pozo, hasta los procesos en superficie como: recolección, separación, tratamiento, almacenamiento y transporte del crudo. Al poner en producción un pozo, se crea una diferencia entre la

⁶⁷ BADRAN, Jesús. Estudio de factibilidad técnico financiera para la implementación de un sistema de levantamiento artificial en un campo colombiano de fluidos composicionales y su validación en un pozo piloto. Tesis especialización. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander, 2016. p. 27.

presión del yacimiento y la presión del fondo del pozo. Esta diferencia de presión, origina el desplazamiento de los fluidos desde la formación hacia el pozo, cuando la presión es mayor en el yacimiento que en el pozo, a su vez por la diferencia de presión entre del fondo del pozo y la de la superficie los fluidos pueden ser extraídos, ver figura 6 y figura 7 ⁶⁶.

Figura 4 Manejo de Petróleo y Gas en Superficie⁶⁸



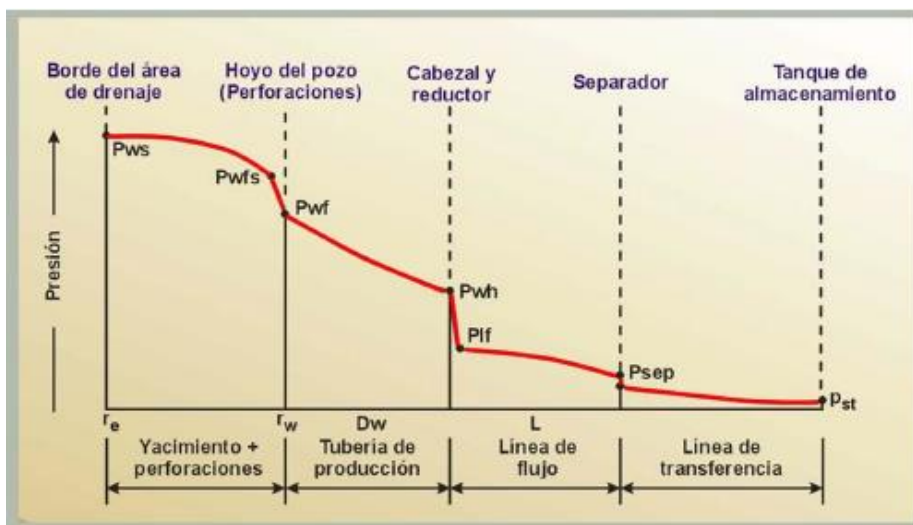
Fuente: MANEJO DE PETRÓLEO Y GAS EN SUPERFICIE. [Base de datos en línea]. (Recuperado en 12 abril 2020). Disponible en <http://manejodepetroleoygas.blogspot.com/2013/12/sistemas-de-levantamiento-artificial.html>.

El proceso de levantamiento de los fluidos del pozo hacia la superficie, puede llevarse a cabo mediante producción del pozo por flujo natural o por métodos de levantamiento artificial. Cuando la energía natural de un yacimiento es suficiente para impulsar los fluidos desde un punto del yacimiento hasta el fondo del pozo, y de allí hasta la superficie, se dice que el pozo produce por flujo natural. A medida que la energía del yacimiento declina, la producción del pozo disminuye hasta el punto en que no puede

⁶⁸ Manejo de Petróleo y Gas en Superficie. [Base de datos en línea]. (Recuperado en 12 abril 2020). Disponible en <http://manejodepetroleoygas.blogspot.com/2013/12/sistemas-de-levantamiento-artificial.html>.

producir por sí solo, debiéndose adoptar una manera de disminuir la presión del fondo del pozo y la vez de transportar los fluidos hasta la superficie, incrementando de esta forma el aporte de fluidos de la formación al pozo. Esto implica el uso de un sistema que permita proporcionar energía de manera artificial al pozo, a estos sistemas se les conoce como Sistemas de Levantamiento Artificial⁶⁹.

Figura 5 Comportamiento de la presión en el sistema de producción⁷⁰



Fuente: CAMARGO, Edgar; AGUILAR, José; RIOS, Adisson; RIVAS, Francklin. Comportamiento de la presión en el sistema de producción. En: Revista Ciencia e Ingeniería. Diciembre-marzo, 2009, Vol.30 no.1., p.25.

Según Badran los métodos de levantamiento artificial pueden ser clasificados en las siguientes dos categorías “Métodos que modifican propiedades físicas de los fluidos del pozo, por ejemplo. Reducción de

⁶⁹ SILVA CORTEZ, Luis Enrique. Programa para la Selección de un Sistema Óptimo de Levantamiento Artificial. En línea]. Disponible en: <http://saber.ucv.ve/bitstream/123456789/102/1/Tesis%20JACL.PDF>.2000.

⁷⁰ CAMARGO, Edgar; AGUILAR, José; RIOS, Adisson; RIVAS, Francklin. Comportamiento de la presión en el sistema de producción. En: Revista Ciencia e Ingeniería. Diciembre-Marzo, 2009, Vol.30 no.1., p.25.

densidad. Y métodos que aplican la acción de una bomba para suministrar energía externa al sistema”⁷¹. Todos los SLA trabajan con particularidades y categorías de operación propias que deben ser debidamente identificadas para la selección adecuada del sistema de más adecuado para determinado proyecto o para establecer en la etapa del pozo a excavar, es así que algunos de los sistemas de levantamiento se describen a continuación.

2.3.1 Bombeo mecánico. El sistema de bombeo mecánico es un sistema de levantamiento artificial que consiste del accionamiento de un balancín a través de una sarta de cabillas que transmite el movimiento a una bomba de succión ubicada en el fondo del pozo logrando así la transferencia del crudo hasta la superficie.

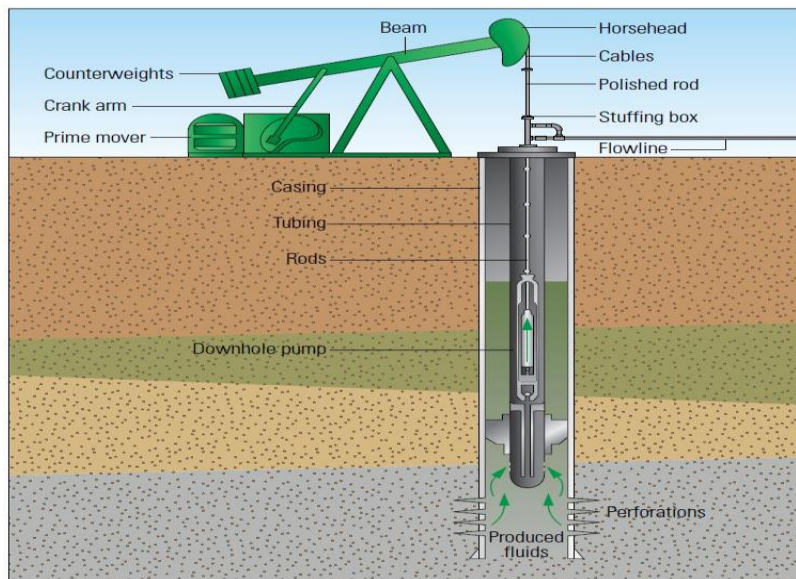
Estas bombas consisten esencialmente de un pistón dentro de un barril con válvulas de entrada y salida de fluido, y pueden ser de acción simple o de acción doble. Las bombas de acción simple son usadas generalmente en combinación con sistemas de empuje mecánico, mientras que las de acción doble se emplean con mayor frecuencia con sistemas de empuje hidráulico, ver figura 8 ⁷¹.

Es el sistema de levantamiento artificial más antiguo y de mayor uso en el ámbito mundial, debido a las pocas limitaciones que presenta. Tiene su mayor aplicación en la producción de crudos pesados y extra pesados, aunque también se usa en la producción de crudos medianos y livianos⁷².

⁷¹ BADRAN, Op.cit, p.27.

⁷²BROWN, Kermit. The technology of artificial lift methods. En línea].Disponible en: https://books.google.com.co/books/about/The_Technology_of_Artificial_Lift_Method.html?id=IVTkAAAAMAAJ&redir_esc=y. 1984.

Figura 6 Bombeo mecánico⁷³



Fuente: Schlumberger. La serie definitoria: sistemas de bomba de varilla [Base de datos en línea]. (Recuperado en 12 abril 2020). Disponible en: <https://www.slb.com/resource-library/oilfield-review/defining-series/defining-rod-pumps>.

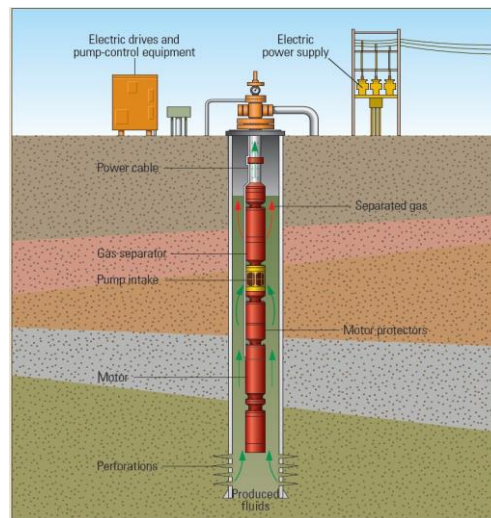
2.3.2 Bombeo electrosumergible. El sistema de Bombeo Electrosumergible es un mecanismo que opera para levantar el crudo desde el fondo del pozo hasta la superficie, valiéndose de impulsores de subsuelo que giran a gran velocidad, está constituido básicamente por bombas eléctricas de tipo centrífugas de múltiples etapas, caracterizado por el manejo de altas tasas de fluidos, alta eficiencia y rentabilidad.

El rango de estos equipos va desde 200 barriles de fluidos por día, superando en ocasiones los 100.000 barriles de fluidos diarios, con

⁷³ Schlumberger. La serie definitoria: sistemas de bomba de varilla [Base de datos en línea]. (Recuperado en 12 abril 2020). Disponible en: <https://www.slb.com/resource-library/oilfield-review/defining-series/defining-rod-pumps>.

profundidades de bombeo que superan los 15.000 pies. Este método de levantamiento artificial es aplicable cuando se desea producir grandes volúmenes de fluidos, en pozos medianamente profundos y con grandes potenciales, sin embargo, los consumos de potencia por barril diario son también elevados, especialmente en crudos pesados, el sistema puede operar dentro de una amplia gama de condiciones y puede manejar cualquier fluido o crudo con los accesorios apropiados para cada caso. El principio básico del sistema de bombeo es transmitir en forma de presión la energía de un motor eléctrico sumergido en el fluido del pozo, ver figura 9⁷¹.

Figura 7 Bombeo electrosumergible



Fuente: Schlumberger. La serie definitiva: bombas sumergibles eléctricas [Base de datos en línea]. (Recuperado en 12 abril 2020). Disponible en: <https://www.slb.com/resource-library/oilfield-review/defining-series/defining-esp>.

El principio de este sistema de bombeo está basado en la operación continua de una bomba centrífuga multietapa cuyos requerimientos de potencia son suministrados por un motor eléctrico de inducción, alimentado desde la superficie a través de un cable de potencia por una fuente de tensión primaria. Una vez se transforma la tensión primaria la energía requerida es transmitida a través del cable de potencia hasta el motor de

subsuelo desde el transformador. El motor genera la fuerza para que transmita a la bomba, compuesta por etapas cada una de las cuales consta de un impulsor que rota y difusor estacionario los cuales imparten un movimiento rotacional al líquido para llevarlo hasta superficie⁷¹.

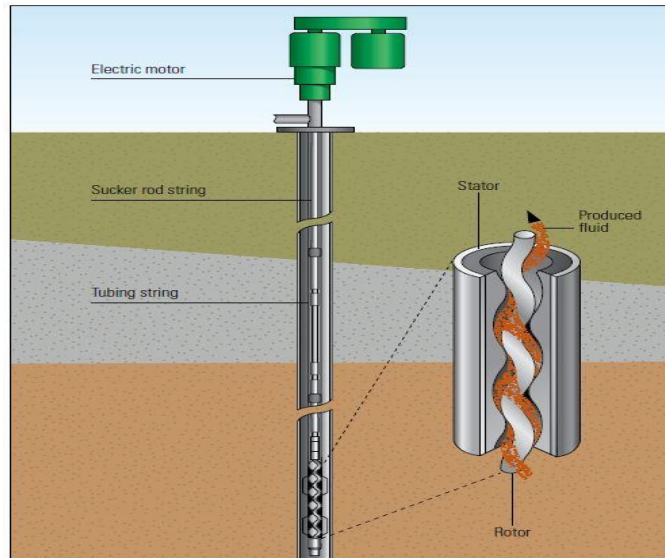
2.3.3 Bombeo de cavidades progresivas. El sistema de bombeo de Cavidad Progresiva consiste en un rotor helicoidal sencillo, rotando excéntricamente dentro de un estator helicoidal elastómero, el cual constituye una doble hélice con una longitud del doble del recorrido del rotor en un giro.

La geometría del ensamblaje determina una serie de cavidades separadas, pero idénticas. Cuando el rotor realiza el giro dentro del estator, estas cavidades se desplazan axialmente de una punta del estator a otra, desde la succión a la descarga, creando la acción de bombeo, esta bomba es de desplazamiento positivo, debido a que las cavidades se encuentran selladas una a la otra, empleando materiales elastómeros, se puede manejar una gama de fluidos de manera eficiente⁷⁴.

Su operación está basada en la acción continua de una bomba de cavidades progresivas estilo tornillo sin fin, cuyos requerimientos de potencia son suministrados por un motor eléctrico de superficie o subsuelo. Cuando el motor está ubicado en la superficie la transmisión de energía a la bomba se da a través de un eje y/o varillas que comunican el motor y la bomba desde la superficie hasta el subsuelo. Pero cuando el motor está en el fondo, se lleva un cable desde superficie el cual les proporcionara la energía al motor para que opere y mueva la bomba, ver figura 10 ⁷³.

⁷⁴ ESP OIL INTERNATIONAL TRAINING GROUP. Bombeo de Cavidad Progresiva: Operaciones, Diagnóstico y Análisis de fallas. Seminario técnico. En línea]. Disponible en: <https://www.academia.edu/16483803/Bombeo-de-cavidad-progresiva>. 2003.

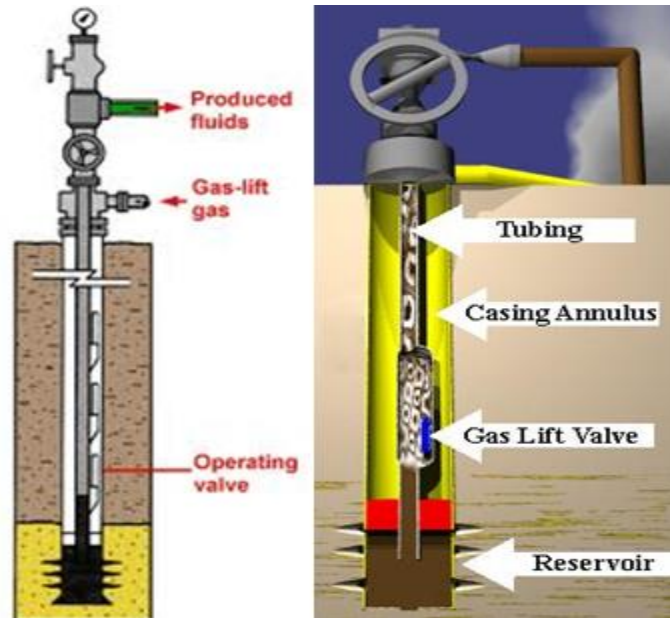
Figura 8 Bombeo de cavidades progresivas



Fuente: SCHLUMBERGER. La serie definitiva: bombas sumergibles eléctricas [Base de datos en línea]. (Recuperado en 12 abril 2020). Disponible en: <https://www.slb.com/resource-library/oilfield-review/defining-series/defining-esp>.

2.3.4 Gas lift. El Levantamiento Artificial por Gas lift, opera mediante la inyección continua de gas a alta presión en la columna de fluidos de producción, flujo continuo, con el objeto de disminuir la densidad del fluido fluyente y reducir el peso de la columna hidrostática sobre la formación, obteniendo así una diferencia de presión entre el yacimiento y el pozo, la cual permite que el pozo fluya adecuadamente o por la inyección de gas a intervalos regulares, para desplazar los fluidos hacia la superficie en forma de tapones de fluidos, flujo intermitente. Como variantes de estos métodos, se han desarrollado otros como la cámara de acumulación, el pistón metálico y el flujo pistón, ver figura 11⁷⁴.

Figura 9 Gas lift⁷⁵



Fuente: TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN. Pozos de elevación de gas oscilantes [Base de datos en línea]. (Recuperado en 12 abril 2020). Disponible en: <https://production-technology.org/gas-lift-well-rocking/>

2.3.5 Bombeo hidráulico. Una bomba hidráulica es un dispositivo tal que, recibiendo energía mecánica de una fuente exterior, la transforma en una energía de presión transmisible de un lugar a otro de un sistema hidráulico a través de un líquido cuyas moléculas estén sometidas precisamente a esa presión.

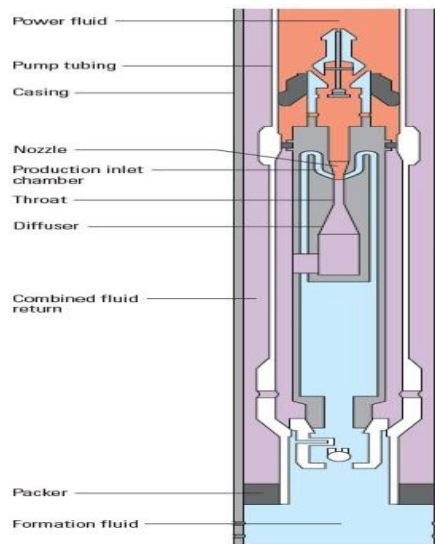
Los sistemas de bombeo hidráulico proporcionan una flexibilidad extraordinaria en la instalación y capacidad de funcionamiento para cumplir una amplia gama de requerimientos de extracción artificial. La instalación de la potencia superficial puede ponerse en un lugar central para servir a

⁷⁵ TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN. Pozos de elevación de gas oscilantes [Base de datos en línea]. (Recuperado en 12 abril 2020). Disponible en: <https://production-technology.org/gas-lift-well-rocking/>.

pozos múltiples, o como una unidad conveniente montada sobre patín localizada en el lugar del pozo individual. El requerimiento de equipo mínimo en el cabezal del pozo acomoda de cerca el pedestal de perforación espaciado de cerca, o las terminaciones de plataforma, así como los requerimientos superficiales de perfil bajo, ver figura 11 ⁷¹.

El bombeo hidráulico se basa en un principio sencillo; la presión ejercida sobre la superficie de un fluido se transmite con igual intensidad en todas las direcciones. Aplicando este principio es posible inyectar desde la superficie un fluido a alta presión que va a operar el pistón motor de la unidad de subsuelo en el fondo del pozo. El pistón motor está mecánicamente ligado a otro pistón que se encarga de bombear el aceite producido por la formación. Los fluidos de potencia más utilizados son agua y crudos livianos que pueden provenir del mismo pozo⁷¹.

Figura 10 Bombeo hidráulico



Fuente: Schlumberger. La serie definitiva: bombas de chorro [Base de datos en línea]. Recuperado en 12 abril 2020). Disponible en: <https://www.slb.com/resource-library/oilfield-review/defining-series/defining-jet-pumps>.

2.4 MARCO LEGAL

En Colombia al Ministerio de minas y energía⁷⁶, le corresponde de conformidad con la ley, controlar las explotaciones mediante sistemas de Levantamiento Artificial, técnicas y sistemas utilizados para llevar a superficie los fluidos, según la NTC: Norma Técnica Colombiana, expedida por el Icontec. El artículo 12 sobre permiso para perforar indica que para iniciar la perforación de un pozo, previamente se debe solicitar y obtener permiso diligenciando el Formulario 4 "Permiso para perforar", este puede ser valorado en un periodo de tres (3) meses contados a partir de la fecha establecida para iniciar la perforación. Si durante este lapso la perforación no se inicia, el contratista dispondrá de treinta (30) días para justificar tal situación y renovar el permiso.

En la misma resolución el artículo 16 de programa de perforación dice que "La perforación de un pozo debe sujetarse al programa aprobado por el Ministerio de Minas y Energía. Cualquier modificación debe ser previamente autorizada actualizando el programa". En casos de profundización o cambio de dirección de un pozo, sin interrumpir las operaciones, se debe dar aviso al Ministerio de Minas y Energía justificando técnicamente la operación proyectada y actualizando el Formulario 4 "Permiso para perforar"⁷⁷. Para la perforación de uno o varios pozos de desarrollo se pueden solicitar y obtener en un solo trámite los permisos diligenciando la Forma 4 para cada pozo y presentando un programa global para la perforación.

⁷⁶ Ministerio De Minas Y Energía De La Republica De Colombia. Resolución 18-1495 de 2009. Por la cual se establecen medidas en materia de Exploración y Explotación de Hidrocarburos. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2009, no. 47462, p.1-168.

⁷⁷ *Ibíd.*, p.1.

En cuanto a la declaración definitiva como la propiedad privada del subsuelo petrolífero⁷⁸, el artículo 2.2.1.2.1.8. Sobre datos y documentos de exploración y explotación, indica que todas las actividades de exploración y explotación de que trata el artículo 28 del Código de Petróleos se entregarán al Ministerio antes del 1º de marzo siguiente al año calendario o parte del mismo a que se refieren y la memoria contendrá un informe documentado sobre la realización del programa de inversiones y actividades, de conformidad con las normas que dicte el Ministerio.

En el mismo decreto el artículo 2.2.1.2.1.13. Sobre la obligación de suministrar información al Ministerio de Minas y Energía señala que toda persona que explore y explote petróleo conjuntamente con gas natural o gas únicamente, de propiedad privada o nacional, está en la obligación de suministrar al Ministerio de Minas y Petróleos los datos de carácter científico, técnico y económico⁷⁹.

Cabe señalar que de ese decreto el artículo 2.2.1.2.1.14. Sobre estimación de las reservas dice que con el fin de conocer reservas y óptimas condiciones de producción “el Ministerio de Minas Petróleos podrá ordenar la ejecución de pruebas o ensayos de producción, presiones de fondo u otros en pozos de petróleo o gas según prácticas usuales en la industria del petróleo”⁸⁰.

El Ministro de Minas y Energía, en ejercicio de sus facultades legales por la cual se establecen medidas en materia de exploración y explotación de

⁷⁸ Ministerio De Minas Y Energía De La Republica De Colombia. Decreto 1348 de 1961 Propiedad Del Recurso. Por la cual se establece el Registro de providencias. [En línea]. Disponible en: <https://www.minenergia.gov.co/propiedad-del-recurso>.

⁷⁹ *Ibíd.*, p.1.

⁸⁰ *Ibíd.*, p.1.

hidrocarburos en yacimientos convencionales continentales y costa afuera⁸¹, señala que las ;

Buenas prácticas de la industria del petróleo: Operaciones, procedimientos, métodos y procesos seguros, eficientes y adecuados, implementados para la obtención del máximo beneficio económico en la recuperación final de las reservas de hidrocarburos, la reducción de las pérdidas, la seguridad operacional, la protección del medio ambiente y de las personas, en el desarrollo de las actividades de exploración y explotación de hidrocarburos.

El Ministerio⁸² sobre requerimientos para la medición de los pozos en el artículo 41 dice que en cuanto a los equipos de medición de hidrocarburos, la obligación de preservar su integridad, la periodicidad con la cual estos deban calibrarse, las certificaciones con las cuales estos deban contar y los demás requerimientos que sean necesarios para desarrollar esta actividad, serán reglamentados por el Ministerio de Minas y se tomarán como base las normas internacionales aplicables en la materia.

En cuanto a las actividades de producción de los pozos⁸³, el artículo 60 sobre los Informes sobre actividades de producción indica que el contratista responsable de todo campo o pozo activo o inactivo, en explotación comercial, prueba extensa o pruebas iniciales, deberá enviar al Ministerio los siguientes informes, formulario 9 de informe mensual de producción de pozos de petróleo y gas, formulario 15 de informe mensual de inyección de

⁸¹ Ministerio De Minas Y Energía De La Republica De Colombia. Resolución 40048 de 2015. Por la cual se establecen medidas en materia de exploración y explotación de hidrocarburos en yacimientos convencionales continentales y costa afuera. Diario Oficial No. 49.396 de 16 de enero de 2015, p.1.

⁸² *Ibíd.*, p.17.

⁸³ *Ibíd.*, p.16

vapor y producción adicional de petróleo, formulario 16 de informe mensual sobre ensayos de potencial de pozos de petróleo, formulario 17 de informe mensual sobre producción de pozos de gas, formulario 20 de informe mensual sobre inyección de agua y producción o de recuperación secundaria, formulario 21 de informe mensual sobre mantenimiento de presión (inyección de gas), formulario 30 de informe mensual sobre producción, plantas y consumos de gas natural y procesado.

3 MÉTODO

Para esta investigación se define como paradigma el empírico analítico que es un modelo del método científico que se basa en la experimentación y la lógica empírica, junto a la observación de fenómenos y su análisis estadístico, es el más usado en el campo de las ciencias como es el caso de esta tesis donde se busca proponer un método de selección multicriterio que mediante técnicas matemáticas permita la selección del método de levantamiento artificial óptimo para un campo de estudio⁸⁴.

Con enfoque se define el cuantitativo que tradicionalmente se ha utilizado en las ciencias empíricas y se centra en los aspectos observables susceptibles de cuantificación utilizando la estadística para el análisis de los datos, de tipo no experimental- interpretativo al aplicar una matriz de selección multicriterio que permita la selección del método de levantamiento artificial óptimo para un campo de estudio⁸⁵.

De tipo observacional-interpretativo pues como define Hernández es una investigación que se apoya de una relación numérica entre las variables del problema de investigación, donde los datos analizados siempre deben ser cuantificables y se pueden describir fenómenos analizando y proyectando el comportamiento de la población⁸⁶.

Se desarrolló la tesis en 3 etapas; en la fase 1 se define la necesidad de investigación del contexto donde el investigador se desarrolla como

⁸⁴ HERNANDEZ SAMPIERI, Roberto. Metodología de la investigación. México: Editorial Mc Graw Hill, 2015, p.114.

⁸⁵ Ibit, p.43.

⁸⁶ Ibit, p.44.

profesional, analizando las alternativas en cuanto a procesos para seleccionar el método de levantamiento artificial. En la fase 2 se buscó caracterizar dos pozos del campo seleccionado a conveniencia por el investigador, identificando tres categorías de variables para seleccionar en el método multicriterio; propiedades de los fluidos, estado mecánico y características de operación del pozo.

En la fase 3 se diseñó la matriz de evaluación del método multicriterio aplicando las variables definitivas para calcular cual es el método de levantamiento artificial óptimo para un campo de estudio.

En este documento se propone un método de selección multicriterio que mediante técnicas matemáticas aplicadas en Microsoft Excel como una matriz de evaluación, aplicando el método apropiado para evaluar alternativas, y finalmente, seleccionar opciones de acuerdo con los tipos de problemas, al extraer las soluciones eficientes o no dominadas del conjunto de soluciones factibles denominadas también como óptimos de Pareto⁸⁷.

3.1 POBLACIÓN

La población determinada a conveniencia del investigador de forma no probabilística es un campo localizado en la parte sur del Valle Superior del Magdalena en el costado Oriental del Valle bajo las estribaciones de la Cordillera Oriental, denominado este sector como Macizo del Garzón.

La Cuenca del Valle Superior del Magdalena consiste en una provincia petrolífera, localizada en la región centro-sur de Colombia entre las Cordilleras Central y Oriental, cubriendo un área de 26.200 Km². Su

⁸⁷ BEGOÑA. Op cit., p.20.

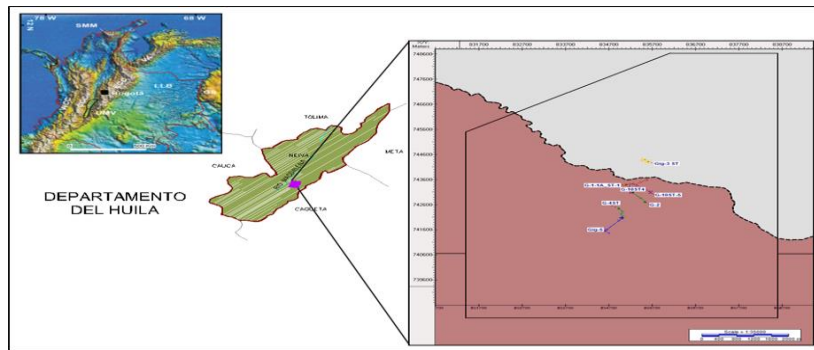
actividad exploratoria ha estado enmarcada en el descubrimiento de 36 campos de petróleo principalmente con 631 MBP y 123 GPCG, 210 pozos exploratorios y alrededor de 22.000 Km, de sísmica 2D; constituyendo así una de las cuencas con producción y mayor actividad exploratoria del país con compañías nacionales y extranjeras operando en ella⁸⁸.

Según las revisiones teóricas se sugieren dos pulsos de generación de hidrocarburos; uno en la fase más temprana del Mioceno que fue restringida principalmente a las cuencas donde estaba presente la secuencia Eoceno-Oligoceno. La alta subsidencia del Eoceno-Oligoceno fue el principal evento responsable para que se generara la primera fase de hidrocarburos, la última fase sucedió durante el periodo del Plioceno asociado al depósito de un grueso paquete de sedimentos de las formaciones Honda y Gigante. En la cuenca del Valle Superior se presentan acumulaciones de aceite en las areniscas de las formaciones Caballos, Monserrate y Honda. En el campo de estudio la potencia almacenador se restringe a las areniscas de la formación Caballos y las areniscas en la parte basal de la formación Villeta-Miembro Tetuán⁹².

El Contrato del Campo de Estudio fue suscrito en octubre de 1996. El área contratada inicial tenía una extensión de 7.748 hectáreas y se encuentra localizada en la Cuenca del Valle Superior dentro de las jurisdicciones municipales de Garzón y Gigante en el Departamento del Huila. Hoy en día el Bloque cuenta con un área de 16898 acres (6.861 hectáreas con 7,025 m²), ver ilustración 1 ⁹².

⁸⁸ KAIRUZ, Edgar; FERREIRA, Paulina; SOLANO SILVA, Orlando. Provincia petrolífera del valle superior del Magdalena, Colombia. Empresa Colombiana de Petróleos (Ecopetrol), Bogotá. Colombia, 2000, p.533. En línea]. Disponible en: http://archives.datapages.com/data/colombia_acgpp/simp7/tomo1/033.htm.

Ilustración 1 Localización general Bloque Campo de estudio



Fuente: adaptación propia del campo de estudio (2020).

De este campo se seleccionó a conveniencia como muestra para elaborar este proyecto de investigación dos pozos activos en extracción que se identificaran para este estudio como pozo 1 y pozo 2.

3.2 DESCRIPCIÓN CAMPO DE ESTUDIO

El Campo de Estudio cuenta con dos pozos productores operando, el primero con bombeo hidráulico como método de levantamiento artificial y el segundo en flujo natural. La producción promedio del Campo es de 1298 BOPD, 4 BWPD y 693 KSCFD. La producción acumulada es de 5.755.397 Bls de crudo, 2.483.073 Bls de agua y 3.925.320 KSCF, ver tabla 4 y tabla 5.

A continuación, se describe el estado actual de los pozos del campo de estudio:

Tabla 4 Estado actual de los pozos del campo

ESTADO	CANTIDAD
Activos	2
Inactivos	0
Abandonados	3
Inyectores	1

Fuente: elaboración propia del proyecto (2020).

El desarrollo de los pozos del campo de estudio seleccionados como muestra para esta investigación, ha presentado grandes retos, problemas operacionales y de ingeniería durante toda su vida productiva. La compañía operadora ha logrado disminuir los impactos negativos y permitir adecuadamente la producción de los pozos, a través de curvas de aprendizaje y experiencia. Dentro de los principales retos que presenta el campo de estudio se encuentran inestabilidad del pozo, colapso de tubería por esfuerzos tectónicos, arenamiento y pescados en fondo.

Durante el 2019 se realizó un workover a cada pozo con el objetivo de incrementar la producción del Campo de estudio; así, el Pozo de estudio 1 fue completado con bombeo hidráulico como método de levantamiento artificial (anteriormente con bombeo electrosumergible) y se cambió la formación debido a la disminución del índice de productividad y problemas de arena del anterior reservorio⁹².

Por otro lado, El Pozo de estudio 2 completado con bombeo electrosumergible estuvo inactivo durante dos años y fue reactivado en el 2019 en flujo natural en otra formación, por el bajo índice de productividad de la anterior. En la siguiente tabla se establecen las características más importantes de los pozos que se encuentran en operación.

3.3 INFORME DE GEOLOGÍA

La estructura del Campo de estudio está localizada en la parte Sur del Valle Superior del Magdalena en el costado Oriental del Valle, en las estribaciones de la Cordillera Oriental y muy cerca al Macizo de Garzón, como se observa en la siguiente ilustración.

El área se caracteriza, en términos generales, por presentar una morfología de vertientes irregulares fuertemente disectadas de relieve escarpado a ondulado suave y pendientes medias a altas generalizadas en toda el área; Se presenta una peniplanicie muy estrecha hacia la parte Norte del pozo Campo Estudio-1A conformada por materiales aluviales antiguos y otra más pequeña al sureste del área sobre la cual se ubica la Inspección de Zuluaga formada por aluviones recientes.

Fisiográficamente comprende el valle aluvial del Río Loro, cuya vertiente Occidental está limitada por una serie de escarpes y la vertiente Oriental por la cuenca de la quebrada Honda, donde sobresale el filo Pico Loro, como rasgo fisiográfico más importante. Los rasgos mayores se orientan en dirección general N-NW siguiendo las estructuras tectónicas regionales y con una orientación EW representado por drenajes secundarios y terciarios como respuesta al control litoestratigráfico y estructural local⁹².

Tabla 5 Características de los pozos

Características	Pozo 1	Pozo 2
Propiedades de los Fluidos		
Gravedad del crudo (°API)	33.2	25.9
Agua y Sedimento (%)	0.31	0.25
GOR (PCN/BLS)	714	237

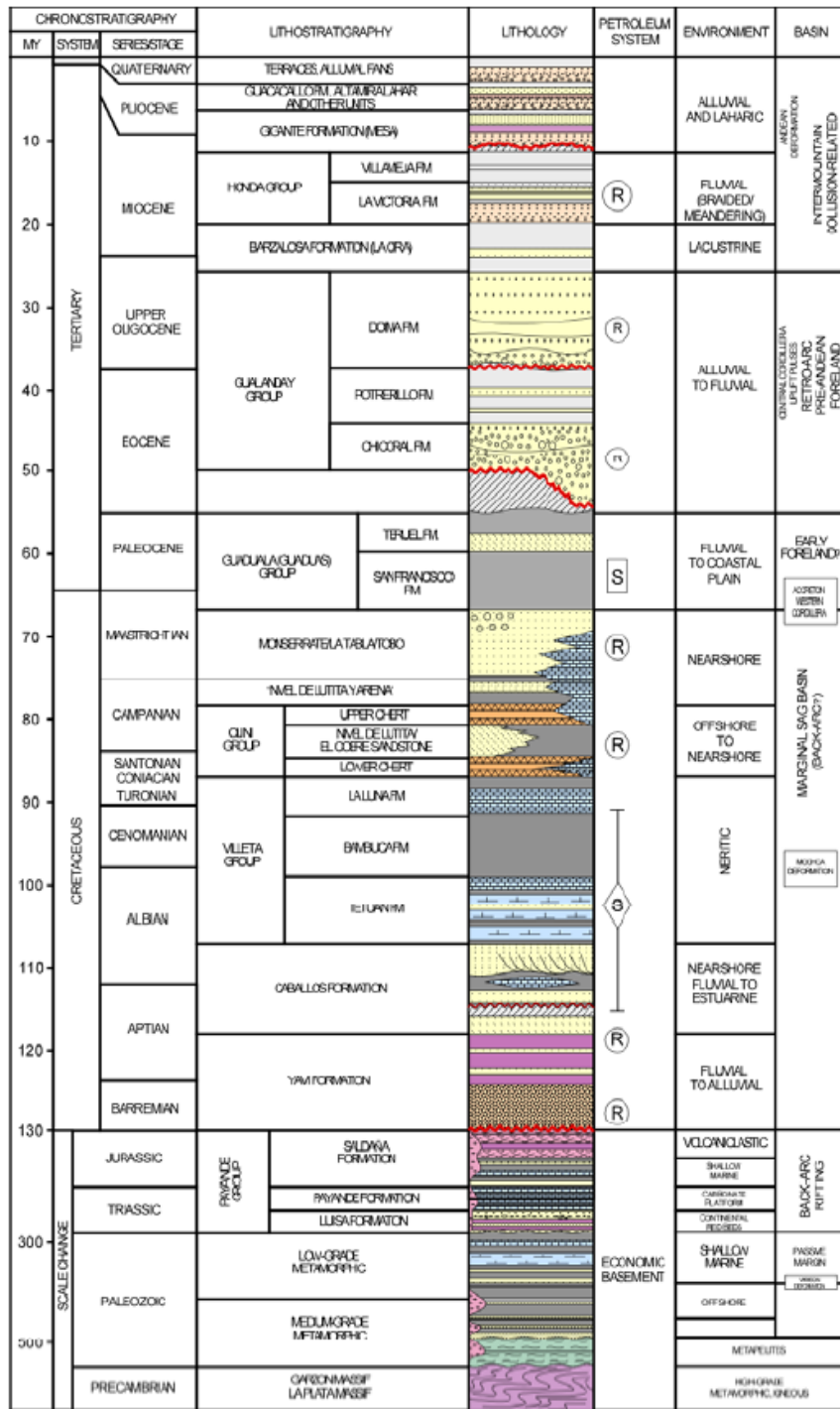
Tetuán. Las trampas son de tipo estructural y para el caso del Campo de estudio, la trampa corresponde a un anticlinal con cierre en 3 direcciones y con orientación NNE-SSW, ver ilustración 2 ⁹².

3.4 ESTRATIGRAFÍA

La ilustración 3 presenta la columna estratigráfica generalizada para la cuenca del Valle Superior del Magdalena (VSM) que corresponde a la compilación de diferentes autores (e.g. Bürgl & Dumit, 1954; De Porta, 1959; Guerrero et al, 2000; Vergara, 1997; Veloza et al, 2006 entre otros) y de la nomenclatura comúnmente utilizada en la industria del Petróleo, tanto para la Subcuenca de Neiva como para la de Girardot, ver ilustración 3 ⁹².

En el área se han encontrado rocas ígneas, metamórficas (Precámbrico–Jurásico), así como la secuencia estratigráfica que abarca rocas desde el Pre Cretáceo, representado por la secuencia vulcanoclástica de la Formación Saldaña (Triásico– Jurásica), sedimentos cretácicos pertenecientes a la Formación Caballos (Albiano), Villeta (Albiano Sup.–Santoniano), Monserrate (Campaniano–Maastrichtiano) y depósitos Terciarios representados por rocas del Grupo Guaduala (Maastrichtiano–Paleoceno), Grupo Gualanday con las Formaciones Chicoral (Eoceno Superior), Potrerillo (Eoceno Superior–Oligoceno) y Doima (Oligoceno); Formación Barzalosa (Mioceno Inferior), la Formación Honda (Mioceno) y la Formación Gigante (Plioceno); y depósitos cuaternarios antiguos y recientes ⁹².

Ilustración 3 Columna Estratigráfica Generalizada



Fuente: adaptación del campo de estudio (2020)

3.5 INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Como instrumentos de recolección de datos se construyen una serie de matrices de evaluación que se pueden ver en las tablas siguientes, adaptadas de Badran⁸⁹ que realizó un estudio de factibilidad financiera para la implementación de un sistema de levantamiento artificial en un Campo Colombiano de fluidos composicionales y su validación en un pozo piloto, quien selecciono una serie de variables y características propias de cada sistema de levantamiento, las cuales fueron sometidas a un proceso de refinamiento a partir de información consultada de textos de referencia, artículos técnicos y trabajos de grado dedicados al área de levantamiento artificial. Se realizan también adaptaciones de Peña⁹⁰ quien ejecuto la evaluación técnica financiera para la selección del sistema de levantamiento artificial para el Campo Corrales Bloque Buenavista por medio de una matriz de selección que se agrupan en Screenings para cada uno de los sistemas de levantamiento artificial y cuyos criterios de selección se basan en valores teóricos.

El método de decisión multicriterio - MDMC se definió como la toma de decisiones de múltiples atributos (MADM), ver tabla 6, los criterios que se seleccionaron para evaluar cual método de levantamiento artificial es el óptimo para un campo de estudio se describen en la tabla 6. Para cada variable a fin de encontrar la mejor opción de método de levantamiento

⁸⁹ BADRAN LIZARAZO, Nafis de Jesús. Estudio de factibilidad financiera para la implementación de un sistema de levantamiento artificial en un Campo Colombiano de fluidos composicionales y su validación en un pozo piloto. Tesis. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2016.

⁹⁰ PEÑA MARTINEZ, Juan Felipe. Evaluación técnico financiera para la selección del sistema de levantamiento artificial para el campo corrales bloque Buenavista. Tesis. Bogotá D.C.: Fundación Universidad De América, 2016.

artificial, se le asignó un conjunto finito de criterios, un valor para poder dar una calificación a las variables V , en un rango numérico n ⁹⁴.

Tabla 6 Método de decisión multicriterio –MDMC

Criterio	Variables
1) Propiedades de los Fluidos	Gravedad del crudo (°API) Agua y Sedimento (%) GOR (PCN/BLS) Viscosidad (cps) Corrosión Arena (ppm)
2) Estado Mecánico	Casing (pulg) Inclinación (°) Profundidad pozo (pies)
3) Características de operación del pozo	Temperatura de Operación (°F) Presión fondo fluyente (psi) Caudal de Operación (bls)

Fuente: elaboración propia del proyecto (2020).

Cada rango representa el valor de rendimiento de la alternativa en el criterio, en donde {1, 2,3, n} es una escala ordinal que se representa en una escala numérica o verbal (lingüística), el orden de los valores no solo se da, sino que también hay una cantidad claramente definida de manera que da una medida de la brecha entre variables según los Screenings de Peña y Badran ⁹⁴.

En la tabla 7 de valores numéricos se presentan los criterios dados a cada variable, se asignó un valor del 1 al 6, donde 1 resulta ser una alternativa inviable, 2 es una alternativa limitada, 3 es una alternativa tolerable, 4 es una alternativa buena, 5 es una alternativa superior y 6 es una alternativa excelente, ver tabla 7. En resultado la sumatoria de las doce (12) variables propuestas, en un estado ideal resultaría en 72 unidades de valor expresadas como:

$$\Sigma = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V_7, V_8, V_9, V_{10}, V_{11}, V_{12}\}$$

Según el óptimo de Pareto una alternativa es eficiente (o Pareto óptima) si toda alternativa que proporcione una mejora en un atributo produce un empeoramiento en al menos otro de los atributos, es decir se selecciona como método óptimo de levantamiento artificial aquel que produzca la mayor sumatoria según la matriz de evaluación.

Tabla 7 Valores Numéricos

Inviabile	Limitado	Tolerable	Bueno	Superior	Excelente
1	2	3	4	5	6

Fuente: elaboración propia del proyecto (2020).

Y según Peña ⁹¹se asigna unos valores porcentuales o grado de relevancia **GR** que en este caso se determinaron a partir de información teórica y experiencias de pozos vecinos, donde se vio que variable influye más en la eficiencia de un sistema de levantamiento artificial, para esta investigación se adaptaron los valores porcentuales según los criterios establecidos así;

- 1) propiedades de los fluidos tiene un 20% de relevancia GR1= 0,2,
- 2) estado mecánico tiene un 50% de relevancia GR2= 0,5 y
- 3) características de operación del pozo tiene un 30% de relevancia GR3= 0,3.

En la tabla 7 de matriz de evaluación se presenta la información recolectada de los Pozos 1 y 2 y según las variables establecidas en el método multicriterio.

⁹¹ Ibit, p.119.

Tabla 8 Matriz de evaluación

Variable De Selección	Pozo 1	Pozo 2
1) Propiedades de los Fluidos		
Gravedad del crudo (°API)	33,2	25,9
Agua y Sedimento (%)	0,31	0,25
GOR (PCN/BLS)	714	237
Viscosidad (cps)	6.18	4.33
Corrosión	No	No
Arena (ppm)	0	0
2) Estado Mecánico		
Casing (pulg)	9 5/8	9 5/8
Profundidad pozo (pies)	15527	13298
Inclinación (°)	5	12
3) Características de operación del pozo		
Temperatura de Operación (°F)	106	80
Presión fondo fluyente (psi)	4800	5400
Caudal de Operación (bls)	835	509

Fuente: elaboración propia del proyecto (2020).

La variable de corrosión “No” significa que los pozos 1 y 2 no tienen problemas actuales de corrosión.

A continuación se presentan los Screening por método de levantamiento artificial seleccionado.

Tabla 9 Screening bombeo mecánico

VARIABLE DE SELECCION	BOMBEO MECANICO - RANGO DE OPERACION					
	Inviabile	Limitado	Tolerable	Bueno	Superior	Excelente
1) Propiedades de los Fluidos						
Gravedad del crudo (°API)	<5.2 y >42	4 - 4.9 y 38.1 - 42	5. - 5.9 y 34.1 - 38	6 - 6.9 y 30.1 - 34	7 - 7.9 y 26,1 - 30	8. - 26
Agua y Sedimento (%)	>95	61-95	46-60	26-45	16-25	0.1-15
GOR (PCN/BLS)	>700	401-700	301-400	201-300	101-200	0-100
Viscosidad (cps)	>7000	5001-7000	3001-5000	0.1-20 y 1001-3000	21-100 y 501-1000	101-500
Corrosión	Si					No
Arena (ppm)	>1000	501-1000	201-500	51-200	11-50	0-10
2) Estado Mecánico						
Casing (pulg)	>9 5/8	2 3/8 y 9 5/8	7		5 1/2	4 1/2
Inclinación (°)	>45		21-45	11-20	6-10	0-5
Profundidad de Operación (pies)	>14000	10001-14000	7001-10000	3001-7000	2501-3000	1-2500
3) Características de operación						
Temperatura de Operación	>600	551-600	401-550	251-400	151-250	1-150
Presión fondo fluyente (psi)	>4000	501-4000	301-500	201-300	14-50 y 101-200	51-100
Caudal de Operación (bls)	>10000	4001-10000	1001-4000	1-10 y 501-1000	11-50 y 301-500	50-300

Fuente: elaboración propia del proyecto (2020).

Tabla 10 Screening bombeo hidráulico

VARIABLE DE SELECCION	BOMBEO HIDRAULICO - RANGO DE OPERACION					
	Inviabile	Limitado	Tolerable	Bueno	Superior	Excelente
1) Propiedades de los Fluidos						
Gravedad del crudo (°API)	<3.9 y >44	4 - 4.9 y 43,1 - 44	5 - 5.9 y 42,1 - 43	6 - 6.9 y 41,1 - 42	7 - 7.9 y 40,1 - 41	8. - 40
Agua y Sedimento (%)		61-100	36-60	21-35	11-20	0.1-10
GOR (PCN/BLS)	>500	401-500	301-400	201-300	101-200	0-100
Viscosidad (cps)	>1000	801-1000	501-800	201-500	0.1-1 y 11-200	1-10
Corrosión			Si			No
Arena (ppm)	>200		101-200	11-100	3-10	0-2
2) Estado Mecánico						
Casing (pulg)	>9 5/8	9 5/8	7	5 1/2	4 1/2	2 3/8
Inclinación (°)			21-90		11-20	0-10
Profundidad de Operación (pies)	1-2000 y >20000	2001-5000	5001-7500	7501-10000	10001-12000 y 15001-20000	12001-15000
3) Características de operación						
Temperatura de Operación	>600	551-600		251-550	1-70 y 151-250	71-150
Presion fondo fluyente (psi)			14-100	101-200	201-500 y >1000	501-1000
Caudal de Operación (bls)	>15000	10001-15000	1-50 y 2001-10000	51-100 y 1001-2000	101-150 y 501-1000	151-500

Fuente: elaboración propia del proyecto (2020).

Tabla 11 Screening PCP- cavidades progresivas

VARIABLE DE SELECCION	BOMBEO CAVIDADES PROGRESIVAS - RANGO DE OPERACION					
	Inviabile	Limitado	Tolerable	Bueno	Superior	Excelente
1) Propiedades de los Fluidos						
Gravedad del crudo (°API)	<3.9 y >39.1	4 - 4.9 y 38.1 - 39	5 -5.9 y 37.1 - 38	6 - 6.9 y 36.1 - 37	7 - 7.9 y 35.1 - 36	8. - 35
Agua y Sedimento (%)	>90	56-90	41-55	16-40	7-15	0.1-6
GOR (PCN/BLS)	>500	301-500		151-300	51-150	0-50
Viscosidad (cps)	>12000	0-100 y 10001-12000	101-500 y 8001-10000	501-1000 y 6001-8000	1001-5000	5001-6000
Corrosión		Si				No
Arena (ppm)	>10000	8001-10000	501-800	201-500	51-200	0-50
2) Estado Mecánico						
Casing (pulg)	>9 5/8	9 5/8	7		5 1/2 y 2 3/8	4 1/2
Inclinación (°)	11-90		9-10		4-8	0-3
Profundidad de Operación (pies)	>9800	7501-9800	5001-7500	3501-5000	2501-3000	1-2500
3) Características de operación						
Temperatura de Operación	>350	281-350		251-280	1-70 y 151-250	71-150
Presion fondo fluyente (psi)			14-100	101-200	201-500 y >1000	500-1000
Caudal de Operación (bls)	1-5 y >5500	4501-5500	3501-4500	6-100 y 2501-3500	101-1500 y 2001-2500	1501-2000

Fuente: elaboración propia del proyecto (2020).

Tabla 12 Screening bombeo electrosumergible

VARIABLE DE SELECCION	BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE - RANGO DE OPERACION					
	Inviabile	Limitado	Tolerable	Bueno	Superior	Excelente
1) Propiedades de los Fluidos						
Gravedad del crudo (°API)	<5.2 y >39.1	5.2 - 5.39 y 38.1 - 39	5.4 - 5.59 y 37.1 - 38	5.6 - 5.79 y 36.1 - 37	5.8 - 6 y 35.1 - 36	6. - 35
Agua y Sedimento (%)				91-99	71-90	0.1 -70
GOR (PCN/BLS)	> 5000	4001-5000	1501 - 4000	501 - 1500	51 - 500	0 -50
Viscosidad (cps)	> 5000	201 - 5000	101 - 200	51 - 100	11-50	0.1 -10
Corrosión			Si			No
Arena (ppm)	>200	101 - 200	51 - 100	16-50	6-15	0-5
2) Estado Mecánico						
Casing (pulg)	2 3/8	4 1/2		5 1/2	7	> 7
Inclinación (°)	>80		71-80	41-70	11-40	0 -10
Profundidad de Operación (pies)	>15000	12501-15000	10001-12500	7501-10000	5000-7500	1-5000
3) Características de operación						
Temperatura de Operación	>450	351-450	326-350	251-235	1-70 y 151-250	71-150
Presion fondo fluyente (psi)				14-30	301-500	>500
Caudal de Operación (bls)	<100 y > 60000	100-200	201-300 y 50001-60000	301-1000 y 30000-50000	1000-10000 y 20001-30000	10001-20000

Fuente: elaboración propia del proyecto (2020).

Tabla 13 Screening gas lift

VARIABLE DE SELECCION	GAS LIFT- RANGO DE OPERACION					
	Inviabile	Limitado	Tolerable	Bueno	Superior	Excelente
1) Propiedades de los Fluidos						
Gravedad del crudo (°API)	<11 y >39.1	11 - 11.9 y 38.1 - 39	12 - 12.9 y 37.1 - 38	13- 14.9 y 36.1 - 37	14 - 14.9 y 35.1 - 36	15 -35
Agua y Sedimento (%)	>90	81-90	41-80	21-40	11-20	0.1-10
GOR (PCN/BLS)	0-50	51-150	151-500	501-1000	1001-5000	>5000
Viscosidad (cps)	0.1-5 y >800	6-10 y 601-800	11-20 y 501-600	21-30 y 201-500	31-40 y 71-200	41-70
Corrosión					Si	No
Arena (ppm)	>12000	5001-12000	1001-5000	501-1000	201-500	0-200
2) Estado Mecánico						
Casing (pulg)	2 3/8	4 1/2		5 1/2	7	> 7
Inclinación (°)		76-90	66-75	46-65	31-45	0-30
Profundidad de Operación (pies)	>18500	15001-18500	1-2500	2501-7500	7501-10000	10001-15000
3) Características de operación						
Temperatura de Operación	>500	401-500	281-400	201-280	1-100 y 151-200	101-150
Presion fondo fluyente (psi)	14-500	501-650	651-850	851-1000	1001-2000	>2000
Caudal de Operación (bls)	1-100 y >35000	101-500 y 30001-35000	501-1000	1001-5000 y 20001-30000	5001-10000 y 15000-20000	10001-15000

Fuente: elaboración propia del proyecto (2020).

3.5.1 Ecuaciones Planteadas. Entonces una vez recogidos los datos en la matriz de evaluación, se procede a aplicar el método multicriterio propuesto para seleccionar el método de levantamiento artificial óptimo para los pozos 1 y 2.

Se le asignó en la matriz de evaluación los valores numéricos que presentan los criterios dados a cada variable, asignando el valor de 1 al 6, según la alternativa.

Se sumaron los valores de las alternativas promediándolos entre sí para sacar un valor total por criterio así;

$$\Sigma C1= \{V1, V2, V3, V4, V5, V6\} / n \quad \{1\}$$

$$\Sigma C2= \{V1, V2, V3,\} / n \quad \{2\}$$

$$\Sigma C3= \{V1, V2, V3\} / n \quad \{3\}$$

Luego se toma la sumatoria de cada criterio ΣC , se multiplica por el grado de relevancia **GR**, se genera la calificación final del sistema aplicando la ecuación;

$$\Sigma Ctotal= ((C1* GR1)+ (C2* GR2)+ (C3* GR3))/3 \quad \{4\}$$

Donde **GR1= 0,2** **GR2= 0,5** **GR3= 0,3**

Para esto se toma la calificación total del criterio 1 (C1) propiedades de los fluidos y se multiplica por el grado de relevancia 1 (GR1= 0,2,) obteniendo un resultado final para esta variable de selección, luego se toma la calificación total del criterio 2 (C2) estado mecánico y se multiplica por el grado de relevancia 2 (GR2= 0,5) obteniendo un resultado final para esta variable de selección, luego se toma la calificación total del criterio 3 (C3) características de operación del pozo y se multiplica por el grado de relevancia 3 (GR3= 0,3).

Al obtener estos tres resultados, se realiza una sumatoria de los mismos obteniendo un valor total que se divide entre la cantidad de las variables, en este caso entre tres, resultando así la calificación final para el sistema de levantamiento artificial. Se debe realizar este procedimiento con cada uno de los sistemas, obteniendo por medio del método multicriterio propuesto y los óptimos de Pareto considerados, el valor mayor que en teoría es el método de levantamiento artificial óptimo para el campo seleccionado.

3.6 RESULTADOS

Al aplicar el método multicriterio propuesto se realizaron para cada método de levantamiento artificial calificaciones para propiedades de los fluidos, estado mecánico y características de operación del pozo, se generaron como resultados para el pozo 1 según la tabla 14 calificaciones de; bombeo mecánico 4,50 puntos, bombeo hidráulico 5,17 puntos, bombeo por cavidades progresivas 4,50 puntos, bombeo electrosumergido 5,67 puntos y gas lift 4,83 puntos.

Tabla 14 Calificación de parámetros pozo 1

VARIABLE DE SELECCION	POZO 1 - SISTEMA LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL				
	Bombeo mecánico	Bombeo hidráulico	Bombeo cavidades progresivas	Bombeo Electrosumergible	Gas Lift
1) Propiedades de los Fluidos					
Gravedad del crudo (°API)	4	6	6	6	6
Agua y Sedimento (%)	6	6	6	6	6
GOR PCN/BLS	1	1	1	4	4
Viscosidad (cps)	4	6	2	6	1
Corrosión	6	6	6	6	6
Arena (ppm)	6	6	6	6	6
TOTAL	4,50	5,17	4,50	5,67	4,83
2) Estado Mecánico					
Casing (pulg)	2	2	2	6	6
Inclinación (°)	6	6	5	6	6
Profundidad de Operación (pies)	1	5	1	1	2
TOTAL	3,00	4,33	2,67	4,33	4,67
3) Características de operación					
Temperatura de Operación (°F)	6	6	6	6	6
Presión fondo fluyendo (psi)	1	5	5	6	4
Caudal de Operación (bls)	4	5	5	4	3
TOTAL	3,67	5,33	5,33	5,33	4,33

Fuente: elaboración propia del proyecto (2020).

Nota: La puntuación total corresponde a la calificación de los criterios Ci.

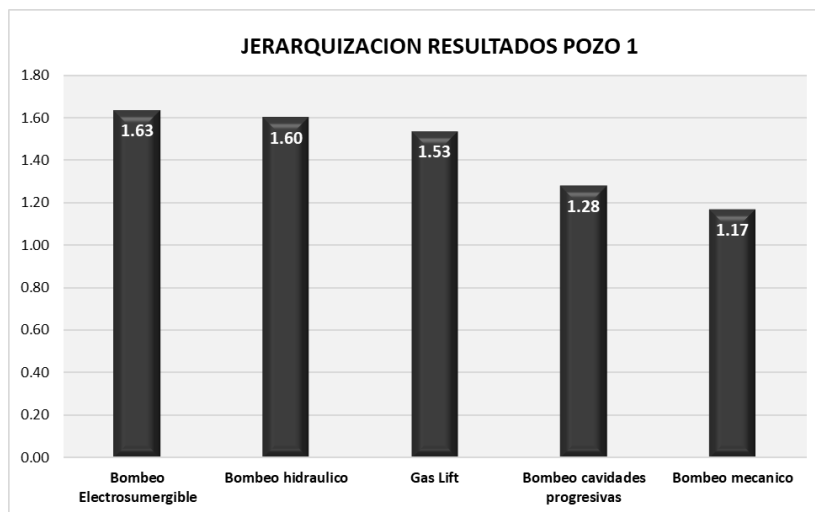
Tabla 15 Jerarquización de Resultados y Selección Pozo1

VARIABLE DE SELECCION	POZO 1 -SISTEMA LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL				
	Bombeo mecánico	Bombeo hidráulico	Bombeo cavidades progresivas	Bombeo Electrosumergible	Gas Lift
Propiedades de los fluidos	4,50	5,17	4,50	5,67	4,83
Estado Mecánico	3,00	4,33	2,67	4,33	4,67
Características de operación	3,67	5,33	5,33	5,33	4,33
TOTAL	1,17	1,60	1,28	1,63	1,53

Fuente: elaboración propia del proyecto (2020).

Entonces según la tabla 15, la calificación final del sistema para bombeo mecánico 1,17 puntos, bombeo hidráulico 1,60 puntos, bombeo por cavidades progresivas 1,28 puntos, bombeo electrosumergible 1,63 puntos, gas lift 1,53 puntos. Donde resulta que el bombeo electrosumergible es el sistema con mejor puntuación y por ende el método de levantamiento artificial óptimo para el pozo 1.

Gráfico 1 Jerarquización de Resultados y Selección Pozo1



Fuente: elaboración propia del proyecto (2020).

Como se puede observar en el gráfico 1 de jerarquización el tipo de método de levantamiento artificial que es menos recomendable según las cifras de las variables del pozo 1 es el bombeo mecánico, seguido por el bombeo por cavidades *progresivas* y gas lift, siendo viable según las puntuaciones hacer bombeo hidráulico y bombeo electrosumergible que es la mejor alternativa según el método multicriterio diseñado.

Tabla 16 Calificación de parámetros pozo 2

VARIABLE DE SELECCION	POZO 2 -SISTEMA LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL				
	Bombeo mecánico	Bombeo hidráulico	Bombeo cavidades progresivas	Bombeo Electrosumergible	Gas Lift
1) Propiedades de los Fluidos					
Gravedad del crudo (°API)	6	6	6	6	6
Agua y Sedimento (%)	6	6	6	6	6
GOR (PCN/BLS)	4	4	4	5	3
Viscosidad (cps)	4	6	2	6	1
Corrosión	6	6	6	6	6
Arena (ppm)	6	6	6	6	6
TOTAL	5,33	5,67	5,00	5,83	4,67
2) Estado Mecánico					
Casing (pulg)	2	2	2	9	6
Inclinación (°)	4	5	1	5	6
Profundidad de Operación (pies)	2	6	1	2	5
TOTAL	2,67	4,33	1,33	5,33	5,67
3) Características de operación					
Temperatura de Operación (°F)	6	6	6	6	5
Presión fondo fluyendo (psi)	1	5	5	6	5
Caudal de Operación (bls)	4	5	5	4	3
TOTAL	3,67	5,33	5,33	5,33	4,33

Fuente: elaboración propia del proyecto (2020).

Nota: La puntuación total corresponde a la calificación de los criterios Ci.

Tabla 17 Jerarquización de Resultados y Selección Pozo2

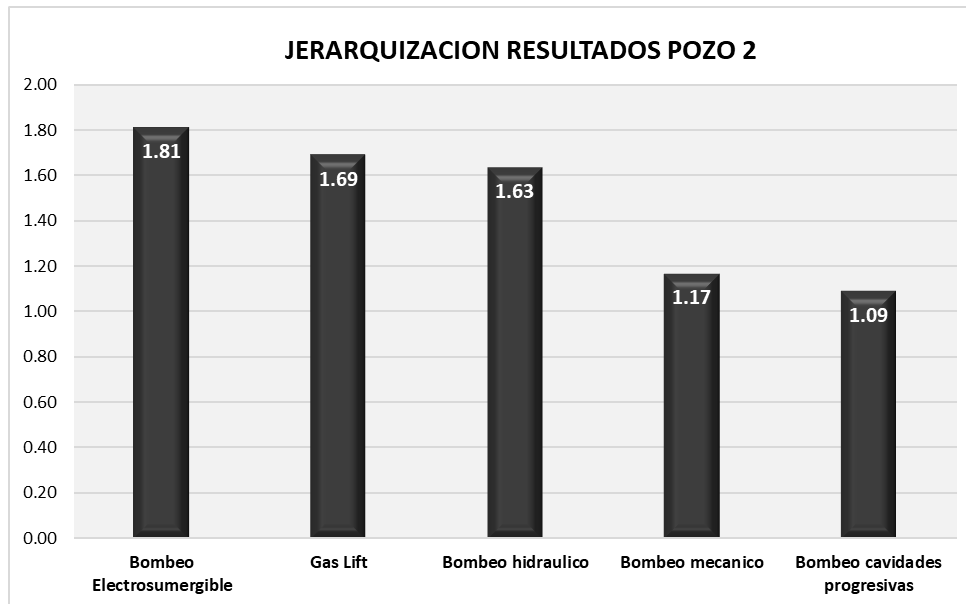
VARIABLE DE SELECCION	POZO 2 -SISTEMA LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL				
	Bombeo mecánico	Bombeo hidráulico	Bombeo cavidades progresivas	Bombeo Electrosumergible	Gas Lift
Propiedades de los fluidos	5,33	5,67	5,00	5,83	4,67
Estado Mecánico	2,67	4,33	1,33	5,33	5,67
Características de operación	3,67	5,33	5,33	5,33	4,33
TOTAL	1,17	1,63	1,09	1,81	1,69

Fuente: elaboración propia del proyecto (2020).

Entonces según la tabla 17, la calificación final del sistema para bombeo mecánico es de 1,17 puntos, bombeo hidráulico 1,63 puntos, bombeo por cavidades progresivas 1,09 puntos, bombeo electrosumergible 1,81 puntos, gas lift 1,69 puntos. Donde resulta que bombeo electrosumergible es el sistema con mejor puntuación y por ende el método de levantamiento artificial óptimo para el pozo 2.

Como se puede observar en el gráfico 2 de jerarquización y selección para el pozo 2 el tipo de método de levantamiento artificial que es menos recomendable según las cifras de las variables es el bombeo de cavidades progresivas seguido del bombeo mecánico e hidráulico, siendo viable según las puntuaciones hacer gas lift y bombeo electrosumergible que es la mejor alternativa según el método multicriterio diseñado para el pozo 2.

Gráfico 2 Jerarquización de Resultados y Selección Pozo 2



Fuente: elaboración propia del proyecto (2020).

3.7 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Al realizar la revisión bibliográfica sobre los métodos de selección multicriterio aplicables a la selección de métodos de levantamiento artificial, se encontró que usualmente se aplican cinco (5) bombeo mecánico, bombeo hidráulico, bombeo por cavidades progresivas, bombeo electrosumergible y gas lift entre muchos.

En los Pozos 1 y 2 del campo de estudio tradicionalmente se instalaba bombeo electrosumergible pero debido al bajo índice de productividad y producción de arena de la formación inicial, se realizó en el 2019 cambio de formaciones y método de levantamiento artificial, sin embargo los resultados de la matriz de evaluación mediante el método de decisión multicriterio arrojaron nuevamente al bombeo electrosumergible como

mejor SLA, teniendo en cuenta que al hacer cambio de formación la producción de arena disminuye a 0.

Por esto al definir un método de selección multicriterio que mediante técnicas matemáticas ayude a la selección de los métodos de levantamiento artificial óptimos para los dos pozos seleccionados del campo de estudio, al elegir los criterios técnicos involucrados en la selección del método es definitivo tener en cuenta las condiciones propias del terreno donde está ubicado el campo, las condiciones ambientales y geológicas, los permisos dados a la empresa que realiza la extracción, los posibles daños de formación y el índice de producción. Ya que la tasa de producción de los campos petroleros se reduce debido a varios parámetros con el tiempo, por lo tanto, es necesario utilizar algunos métodos para compensar la reducción de la tasa de producción y el método de elevación artificial es la forma más adecuada de aumentar la tasa de producción mediante la reducción de la presión del fondo del pozo.

Entonces según las condiciones planteadas los resultados permiten analizar que si es posible seleccionar el método de levantamiento artificial óptimo para el campo de estudio, mediante la aplicación del método de decisión multicriterio propuesto, ya que la matriz de evaluación propuesta es determinada por variables que en cualquier pozo se especifican en los informes diarios de producción, los criterios definidos para este proyecto de investigación son básicos en el proceso de extracción y el método de decisiones de múltiples atributos fue favorable para cumplir los objetivos propuestos en este proyecto de investigación. Sobre todo cuando en el campo no se cuenta con herramientas como los software TOPSIS o ELECTRE que son los medios contemporáneos más utilizados, pero que a veces por las condiciones de la zona o por otros no se pueden utilizar y en cambio si se tiene acceso a instrumentos de uso cotidiano como Excel.

4 CONCLUSIONES

En el proceso de realizar este proyecto de investigación se determinaron una serie de condiciones desde las referencias teóricas, que ayudaron a proponer un método de selección multicriterio aplicando técnicas matemáticas para seleccionar el método de levantamiento artificial óptimo para un campo de estudio, se definió este problema de investigación de forma específica al campo profesional en el que como ingeniera tengo acceso y donde en la cotidianidad percibo problemas de funcionamiento administrativos, de políticas económicas, de legislación pero sobre todo operativos que exigen de una reacción inmediata y soluciones a problemas de funcionamiento de campo de extracción, en el cual la decisión de qué método de levantamiento artificial usar es muy importante para la rentabilidad a largo plazo del campo pues una selección inadecuada del levantamiento artificial puede reducir la producción y aumentar el costo operativo sustancialmente. Por ende, una vez que una decisión fue exitosa en un pozo, rara vez se puede ser alterado el método seleccionado porque fue y sigue siendo óptimo para las condiciones existentes en el campo, sin embargo, en la práctica, este proceso involucra un número limitado de variables y conocimiento empírico lo cual aumenta la probabilidad de falla del sistema debido a la incompatibilidad entre la bomba y el pozo.

Entonces por lo anterior se concluye que la selección del sistema de levantamiento artificial es un factor clave para mejorar la eficiencia energética, aumentar los beneficios y ampliar la vida útil de los activos en cualquier pozo productor de petróleo. Teóricamente esta selección debe tener en cuenta un gran número de variables lo que dificulta la elección del sistema óptimo, se logró así al determinar las características específicas de los campos petroleros en Colombia y en la zona donde se ubican los pozos seleccionados para la muestra en este proyecto de investigación, proponer

un método de selección multicriterio que mediante técnicas matemáticas permita la selección del método de levantamiento artificial óptimo para un campo de estudio, basado en un proceso de selección con alternativas finitas, exactamente 12 divididas en tres criterios de selección, con tres grados de relevancia especificados por la revisión teórica de los parámetros que intervienen en la extracción de los pozos y la experiencia corporativa que tienen la compañía que maneja los pozos analizados.

De otro lado con respecto en cuanto a la revisión bibliográfica sobre el estado del arte de los métodos de selección multicriterio aplicables a la selección de métodos de levantamiento artificial, se logró determinar que los MDMC en la extracción de petróleo han sido ampliamente adaptados de las ciencias administrativas a la ingeniería de petróleo, por la necesidad en los campos y gracias a la experticia de profesionales que han vinculado métodos que se fundamentan en planteamientos teóricos, donde mediante ecuaciones se aplican un alto volumen de datos hasta métodos que usan software que facilitan la determinación de soluciones pero que por sus altos costos no son fáciles de adquirir además de que demandan de un profesional capacitado en el manejo del software en específico.

Se logra concluir que si es posible seleccionar el método de levantamiento artificial óptimo para el campo de estudio mediante la aplicación del método de decisión multicriterio, en este proyecto se desarrolló este objetivo gracias al Óptimo de Pareto por que presenta la ventaja de asignar grados de relevancia mediante la experiencia del profesional, pero a la vez se puede hacer también con los datos teóricos que se pueden hallar de los pozos. De esta forma, los porcentajes de relevancia asignados para los criterios son 1) propiedades de los fluidos 20%, 2) estado mecánico 50% y 3) características de operación del pozo 30%.

En relación a esto los criterios involucrados en la selección del método óptimo de levantamiento artificial aplicables a los modelos de decisión multicriterio para el campo de estudio, que se determinaron son; 1) propiedades de los fluidos (API, Agua y sedimentos, GOR, Viscosidad, Corrosión y arena), 2) estado mecánico (Casing, inclinación, profundidad del pozo), 3) características de operación del pozo (Temperatura de operación, presión de fondo fluyente, caudal de operación).

Entonces para proponer un método de selección multicriterio que mediante técnicas matemáticas ayude a la selección de los métodos de levantamiento artificial óptimos para dos pozos seleccionados del campo de estudio, para este proyecto de investigación se propuso el óptimo de Pareto, por la posibilidad que le brinda al ingeniero según su experiencia de determinar el valor de las variables a incluir en el método de selección multicriterio, así como asignar a los criterios establecidos, valores porcentuales de relevancia acorde a las características, retos y problemas más importantes del campo de estudio para identificar el sistema de levantamiento artificial óptimo. Finalmente la aplicación del método de decisión multicriterio Óptimo de Pareto determinó que el método de levantamiento artificial óptimo para los Pozos 1 y 2 del campo de estudio es el bombeo electrosumergible, alcanzado la mayor calificación con 1.63 y 1.81 puntos, respectivamente.

Entonces se puede decir que el modelado matemático para la toma de decisiones en la selección de sistemas de levantamiento artificial es una excelente manera de reducir los procesos que requieren mucho tiempo, estandarizar los procedimientos, disminuir la probabilidad de errores, optimizar el rendimiento y aumentar la vida útil de los activos.

Sin embargo, es de considerar que los algoritmos y el software no son un reemplazo completo para el proceso de selección de SLA de ingeniería

debido a la cantidad y complejidad de los parámetros involucrados; ambas metodologías se complementan entre sí. Y cada campo petrolífero se puede dividir en sectores o en un pozo individual; cada uno de ellos tiene un modelo de análisis. Cualquiera de estos modelos podría diferir radicalmente entre sí o, por el contrario, ser muy similar en sus parámetros. Esas diferencias en las variables de entrada podrían resultar en clasificaciones significativamente diferentes en cada método MCDM después de su implementación y para cada pozo en específico.

BIBLIOGRAFÍA

AFSORDEGAN, Arayeh. Contribution to multicriteria decision making in sustainable energy management based on Fuzzy and qualitative reasoning. Tesis Doctoral, Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2015.

ALEMI, Mehrdad; JALALIFAR, Hossein; KAMALI, Gholam; KALBASI, Mansou. A mathematical estimation for artificial lift systems selection based on ELECTRE model. En: Journal of Petroleum Science and Engineering, Abril-mayo, 2011, vol.78 no. 1, p. 193–200.

ARROW, Kenneth; RAYNAUD, Herve. Social Choice and Multicriterion Decision-Making. Cambridge: The MIT Press, 1986.

BACCA, Guillermo. Ingeniería Económica. Bogotá: Fondo Educativo Panamericano, 2005.

BADRAN LIZARAZO, Nafis de Jesús. Estudio de factibilidad financiera para la implementación de un sistema de levantamiento artificial en un Campo Colombiano de fluidos composicionales y su validación en un pozo piloto. Tesis. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2016.

BARRIO, Armando; PÉREZ, Andrés. La negativa a la fracturación hidráulica crece en Europa. [En línea]. Disponible en: <http://www.iularioja.org/fracking/>.

BEGOÑA, Vitoriano. Teoría de la decisión: decisión con incertidumbre, decisión multicriterio y teoría de juegos. Tesis Doctorado. Madrid: Universidad Complutense de Madrid, 2007. p. 20.

BERNAL, Sergio; NIÑO, Daniel. Modelo multicriterio aplicado a la toma de decisiones representables en diagramas de Ishikawa. Tesis de pregrado. Bogotá: Universidad Distrital Francisco de Paula Santander, 2018, 40p.

BONET, Carlos. Ley de Pareto aplicada a la fiabilidad. En: Ingeniería Mecánica, septiembre-diciembre, 2005, vol. 8, no. 3, p. 1-9.

BROWN, Kermit. The technology of artificial lift methods. [En línea]. Disponible en: https://books.google.com.co/books/about/The_Technology_of_Artificial_Lift_Method.html?id=IVTkAAAAMAAJ&redir_esc=y. 1984.

CABELLO HERCE, Adrián. Métodos de decisión multicriterio y sus aplicaciones. Tesis de grado. Rioja: Universidad de la Rioja, 2017, p.12.

CAMARGO, Edgar; AGUILAR, José; RIOS, Adisson; RIVAS, Franklin. Comportamiento de la presión en el sistema de producción. En: Revista Ciencia e Ingeniería. Diciembre-Marzo, 2009, Vol.30 no.1., p.25.

CARRANZA PEREZ, Julio Nolfer. Propuesta para la selección del método de levantamiento artificial a utilizar en el campo recetor. Tesis de Magíster. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander, 2014.

CHACÍN, Nelvy. Bombeo de cavidades progresivas. Anzoategui, 2003. [En línea]. Disponible en:

https://www.academia.edu/26872582/Chacin_N._-_Bombeo_de_Cavidad_Progresiva.

CIULLA, Francesco. Sistemas con bombas de cavidad progresiva. Seminario técnico. Weatherford ALS, 2003. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/321677431/Francesco-P-Ciulla-Principios-Fundamentales-para-Disenos-de-Sistemas-con-Bombas-de-Cavidad-Progresiva-pdf>.

CONSTANTE BARRAGAN, Luis Alberto. Localización, detección y análisis de fallas en el sistema de bombeo electrosumergible para la región amazónica del Ecuador. Tesis de pregrado, Latacunga: Escuela Politécnica Del Ejército ESPE – LATACUNGA, 2016.

DAVOOD, Sabaei. A review of multi-criteria decision making methods for enhanced maintenance delivery, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://cyberleninka.org/article/n/876116.pdf>.

DOUMPOS, Michael; GRIGOROUDIS, Evangelius. Multicriteria decision aid and artificial intelligence: links, theory and applications. Hoboken: Editorial Wiley-Blackwell, 2013, p. 76.

ECOPETROL. Relación de actividades, suministros y servicios. Bogotá D.C., 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.ecopetrol.com.co/index.html>.

EHSAN, Fatahi; HOSSEIN, Jalalifar; PYMAN, Pourafshari; BABAK, Moradi. Selection of the Best Artificial Lift Method in One of the Iranian Oil Field by the Employment of ELECTRE Model. [En línea]. {7 de mayo 2017}. Disponible en

http://www.journalrepository.org/media/journals/BJAST_5/2011/Oct/1318834205-Jalaifer_2011BJAST585.pdf.

ESP OIL INTERNATIONAL TRAINING GROUP. Bombeo de Cavidad Progresiva: Operaciones, Diagnóstico y Análisis de fallas. Seminario técnico. [En línea]. Disponible en: <https://www.academia.edu/16483803/Bombeo-de-cavidad-progresiva>. 2003.

FIGUEIRA, Jose; GRECO, Salvatore; ROMAN, Slowinski. Building a set of additive value functions representing a reference preorder and intensities of preference: GRIP method. En: European Journal of Operational Research, 2009, vol. 195 no.2, p.460-486.

GARCÍA, Ana; MARTÍNEZ, Elena; CAMPOS, Cristina; LÓPEZ, Juan Manuel. Técnica multicriterio de ayuda a la decisión. Madrid: Editorial Pearson, 2013.

GÓMEZ, Manuel. Evaluación y análisis comparativo de diferentes métodos de selección de sistemas de levantamiento artificial. Tesis de Magíster en Ciencias. Caracas: Universidad Central de Venezuela, 2005.

GRECO, Salvatore; KADZIŃSKI, Milosz; MOUSSEAU, Vincent; SŁOWIŃSKI, Roman. Robust ordinal regression for multiple criteria group decision: UTAGMS-GROUP and UTADISGMS-GROUP. En: Decision Support Systems, 2012, vol. 52 no.3, p.549-561.

HERNANDEZ SAMPIERI, Roberto. Metodología de la investigación. México: Editorial Mc Graw Hill, 2015.

HUANG, Huaxiong; Paulhus, Marc. Optimal Strategy for cyclical Steam Stimulation Oil Production: A mathematical Model. Canada, 2001. [En línea]. Disponible en: http://www.math.ualberta.ca/ami/CAMQ/pdf_files/vol_9/9_3/9_3b.pdf.

HUSSEIN ALBOUDWAREJ, Joao. Monitoreo de la producción de petróleo viscoso, 2006. [En línea]. Disponible en: <https://www.slb.com/-/media/files/oilfield-review/heavy-oil-3-spanish>.

HWANG, Ching-Lai; YOON, Kwangsun. Multiple attribute decision making: Methods and Applications. New York: Springer Verlag, 1981.

KAIRUZ, Edgar; FERREIRA, Paulina; SOLANO SILVA, Orlando. Provincia petrolífera del valle superior del Magdalena, Colombia. Empresa Colombiana de Petróleos (Ecopetrol), Bogotá.

MANEJO DE PETRÓLEO Y GAS EN SUPERFICIE. [Base de datos en línea]. (Recuperado en 12 abril 2020). Disponible en <http://manejodepetroleoygas.blogspot.com/2013/12/sistemas-de-levantamiento-artificial.html>.

MANSAROVAR ENERGY COLOMBIA LTDA. Informes técnicos de geología y yacimientos Campo Abarco, 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.mansarovar.com.co/documents/20182/30334/2014+-+Informe+de+Sostenibilidad.pdf/7a5c1faf-8b65-4abb-843a-c2cfab2a15bf>.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA. Decreto 1348 de 1961 Propiedad Del Recurso. Por la cual

se establece el Registro de providencias. [En línea]. Disponible en: <https://www.minenergia.gov.co/propiedad-del-recurso>.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA. Resolución 40048 de 2015. Por la cual se establecen medidas en materia de exploración y explotación de hidrocarburos en yacimientos convencionales continentales y costa afuera. Diario Oficial No. 49.396 de 16 de enero de 2015, p.1.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA. Resolución 18-1495 de 2009. Por la cual se establecen medidas en materia de Exploración y Explotación de Hidrocarburos. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2009, no. 47462, p.1-168.

NAVARRO SABOGAL, Jhon Fredy. Selección, diseño y puesta en funcionamiento del sistema de levantamiento artificial más adecuado para un campo ubicado en la Cuenca de los Llanos Orientales. Tesis de pregrado. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander, 2018.

ORJUELA PAVA, Andrés Felipe. Evaluación técnica y financiera del desempeño del sistema de levantamiento artificial bombeo por cavidades progresivas metal- metal para la producción de crudo pesado en el campo abarco. Tesis de pregrado. Bogotá: Fundación Universidad De América. p.42.

PARIS DE FERRER, Magdalena. Fundamentos Ingeniería de Yacimientos. Maracaibo, 1998. [En línea]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/georgehsterling/fundamentos-de-ingenieria-de-yacimientos-magdalena>.

PEÑA MARTINEZ, Juan Felipe. Evaluación técnico financiera para la selección del sistema de levantamiento artificial para el campo corrales bloque Buenavista. Tesis. Bogotá D.C.: Fundación Universidad De América, 2016.

PEÑA SEVERICHE, Kevin Andrés; SERNA VELÁSQUEZ, José Fernando. Diseño del módulo de selección preliminar de sistemas de levantamiento artificial para el manual general de completamiento de ECOPETROL S.A. Tesis de pregrado, Bogotá: Fundación Universidad De América, 2017.

POHEKAR, S; RAMACHANDRAN, M. (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning-A review. En: Renewable and Sustainable Energy. Agosto, 2003, vol.8 no.4, p. 365–381.

RAMIREZ, Marto. Bombeo Electrosumergible: Análisis, Diseño, Optimización y Trouble Shooting. Monagas, 2009. [En línea]. Disponible en: <https://christian3306.files.wordpress.com/2010/10/bombeo-electrosumergible.pdf>.

ROCA FIGUEROA, Robert Norberto; PERERO MACÍAS, Damián Leonardo. Análisis técnico económico para el cambio de sistema de levantamiento artificial de bombeo hidráulico a bombeo electrosumergible realizado en el campo Fict". Tesis de pregrado. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica Del Litoral, 2016.

RODRIGUEZ, William; ROBLES Carlos. Herramienta software para el análisis y diseño de sistemas de levantamiento artificial convencionales.

Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2012. [En línea]. Disponible en: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2010/136266.pdf>.

ROY, Bernard; SŁOWIŃSKI, Roman. Questions guiding the choice of a multicriteria decision aiding method. En: EURO Journal on Decision Processes. Abril-mayo, 2013, vol. 1 no.2, p. 69-97.

SAATY, Thomas. The Analytic Network Process. Pittsburgh: RSW Publications, 1996.

SAAVEDRA TRUJILLO, Néstor Fernando; JIMÉNEZ INOCENCIO, Favio Yovany. Necesidades de Innovación y Tecnología para la industria de petróleo y gas en Colombia. En Revista de Ingeniería. Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia. Enero – junio, vol.10, 2014, p. 50.

SCHLUMBERGER OILFER SYSTEM. Geologic y Geophysical, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/s/seal.aspx>.

SCHLUMBERGER OILFER SYSTEM. La serie definitoria: sistemas de bomba de varilla [Base de datos en línea]. (Recuperado en 12 abril 2020). Disponible en: <https://www.slb.com/resource-library/oilfield-review/defining-series/defining-rod-pumps>.

SILVA CORTEZ, Luis Enrique. Programa para la Selección de un Sistema Óptimo de Levantamiento Artificial. En línea]. Disponible en: <http://saber.ucv.ve/bitstream/123456789/102/1/Tesis%20JACL.PDF.2000>.

TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN. Pozos de elevación de gas oscilantes [Base de datos en línea]. (Recuperado en 12 abril 2020). Disponible en: <https://production-technology.org/gas-lift-well-rocking/>.

ZAVADSKAS, Edmundas; TURSKIS, Zenonas; TAMOSAITIENE, Jolanta, VALERIJA, Marina. Multicriteria selection of project managers by applying grey criteria. En: Technological and Economic Development of Economy, abril-mayo, 2008, vol. 14 no.4, p. 462-477.