

**Evaluación de la huella de carbono producida por los sistemas de levantamiento
artificial convencionales en un campo colombiano**

María Alejandra Martínez Durán, Catalina Useche Narváez

Trabajo de Grado para Optar el título de ingeniero de petróleos

Director

Erik Giovany Montes Páez

Ingeniero de petróleos

Magíster en ingeniería de hidrocarburos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físico-Químicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2018

Dedicatoria

La vida se encarga de mostrarte el camino, de darte las lecciones y oportunidades necesarias y de presentarte las personas correctas, para todas ellas dedico esta tesis.

A Dios por sus bendiciones y amor, a mi mami por su apoyo incondicional, amor desmesurado y eterna capacidad de protección; a mi padre por su inigualable forma de ser, por su acompañamiento y por todo el amor; a mis dos pequeñas (ya no tan pequeñas) por ser mis compañeras de vida, por amarme sin condiciones, por ser cómplices en todos los proyectos de mi vida; a ti Santi por enseñarme a dar todo de mí, por ser mi primer amor y el último, y por todas las aventuras que nos esperan; a mis abuelitos por ser ellos quienes complacen mis caprichos y llenan mi vida de dulzura, en especial a mi tito José quien a mitad de camino partió al lugar de nunca volver, a él porque aunque su mente se olvidó de mí, en su corazón viviré por siempre; a familia en general por toda la alegría que me brinda, a todos mis primitos por ser mis pequeños hermanos, a Meli por ser la princesa de la familia y a Tomás porque aún no te conozco y muero porque me abrace; a la familia Quintero Machado por acogerme en su hogar; a mi director de Tesis mi profe Erik por hacer de este paso por la universidad un recorrido de mucha alegría y aprendizaje; a Cata porque me demostró que si es posible realizar un proyecto en equipo sin ninguna contrariedad, porque de este proyecto gané una amiga que admiro mucho y respeto, gracias por la PACIENCIA; a mis amigos Anita, Lili, Male, Camilo Y Omar por ser mi familia en Bucaramanga, a toda la Selección de baloncesto, en especial al Entrenador, por enseñarme disciplina, entrega, trabajo en equipo y sentido de pertenencia, a todos mis amigos. Sé que es un poco larga la dedicatoria, pero tengo que agradecer de alguna manera lo buena que ha sido la vida conmigo, por último y más importante, quiero dedicártela a ti por tomarte el tiempo en leer este libro.

MARIA ALEJANDRA MARTINEZ DURAN

Dedicatoria

A Dios por sus infinitas bendiciones, por guiarme y cuidarme durante esta etapa de mi vida.

A mi mami, por su apoyo incondicional, a mi papi por su esfuerzo y a mi hermano por ser mi consejero, a los tres por darme mucho amor.

A mis abuelos y a mi tía por la enorme ayuda que me brindaron durante esta etapa.

A mis amigos por ser mi familia en Bucaramanga.

A mi amiga María Alejandra por la ayuda, comprensión y esfuerzo realizado en este proceso.

Al M.Sc Erik Giovany Montes Páez por ser el director de este proyecto, por sus enseñanzas y ayuda brindada, Muchas gracias.

Y finalmente a toda mi familia y a la vida porque a pesar de los obstáculos siempre nos pone algo en el camino para demostrarnos la razón por la cual se tiene que seguir luchando hasta el final convirtiéndonos en personas fuertes y tenaz con lo que se ama.

CATALINA USECHE NARVAEZ

Agradecimientos

Las autoras agradecemos a todas las personas y organizaciones que hicieron posible el desarrollo de este proyecto:

En primer lugar a Dios,

A la prestigiosa Universidad Industrial de Santander y a la escuela de ingeniería de petróleos por formarnos como profesionales íntegras y capaces.

A la sede Socorro por iniciar nuestro proyecto profesional.

Al grupo de Modelamiento de Procesos de Hidrocarburos (GMPH), por brindarnos herramientas para complementar nuestro crecimiento y el de este plan.

Al M.Sc. Erik Giovany Montes Páez, director de esta tesis, por su inagotable fuente de comprensión, pedagogía y apoyo.

Al M.Sc. Diego Monsalve por su colaboración y atención, la cual fue de vital importancia para este proyecto

Al I.Q. Carlos Andrés Naranjo por su tiempo para resolver inquietudes.

Finalmente un agradecimiento muy especial a nuestras familias por todo el amor y respaldo incondicional.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	19
1. Fundamento teórico	21
1.1 Huella de carbono.....	21
1.1.1 Marcos metodológicos internacionales.....	22
1.1.2 Cálculo de la huella de carbono.....	23
1.2 Sistemas de levantamiento artificial convencionales	27
1.2.1 Bombeo mecánico	27
1.2.2 Bombeo electrosumergible	29
1.2.3 Bombeo de cavidades progresivas.....	31
2. Casos de estudio.....	33
2.1 Metodología de selección	33
2.2 Criterios de selección ideal.....	34
2.3 Determinación de propiedades	34
2.3.1 Gravedad específica, densidad del aceite y densidad de la mezcla.	35
2.3.2 Índice de productividad, presión de fondo fluyente	36
2.3.3 Nivel dinámico y nivel de fluido.	41
3. Diseño de los sistemas de levantamiento artificial	43
3.1 Bombeo mecánico	44
3.1.1 Profundidad de la bomba.....	44
3.1.2 Presión de la bomba.....	45

3.1.3 Tipo de unidad.....	45
3.1.4 Tasa de stroke y stroke máximo.	46
3.1.5 Potencia.	46
3.2 Bombeo electrosomergible.....	50
3.2.1 Nivel de profundidad de la bomba.	51
3.2.2 Presión de entrada (intake) a la bomba (PIP).	52
3.2.3 Carga dinámica total (TDH).	52
3.2.3.1 Nivel de fluido (Hd).	52
3.2.3.2 Pérdidas por fricción en el tubing (HF).	52
3.2.3.3 Pérdidas de fricción en la línea de flujo (Pd).	53
3.2.4 Tipo de bomba.	54
3.2.4.1 Levantamiento por etapa de la bomba.	54
3.2.4.2 Numero de etapas	54
3.2.4.3 Potencia de la bomba.....	55
3.2.4.4 Eficiencia de la bomba.	55
3.2.5 Motor.	58
3.2.6 Cable eléctrico.....	58
3.2.7 Voltaje en superficie.....	60
3.3 Bombeo de cavidades progresivas.....	63
3.3.1 Profundidad de la bomba.	63
3.3.2 Presión de entrada a la bomba (PIP).....	63
3.3.3 Carga dinámica total (TDH).	63
3.3.4 Selección del elastómero.	63
3.3.5 Tipo de bomba.	64

3.3.5.1 Potencia requerida por la bomba.	65
3.3.6 Requerimiento de torque.	65
3.3.6.1. Torque hidráulico.	67
3.3.6.2 Torque de resistencia.	67
3.3.7 Carga axial.	68
3.3.8 Selección del cabezal.	69
3.3.9 Potencia consumida por el motor.	69
3.4 Resumen de Resultados.	70
4. Evaluación de la huella de carbono producida por los sistemas de levantamiento artificial convencionales mediante programación en la herramienta Microsoft Excel	73
4.1 Definición del objetivo y alcance	73
4.1.1 Objetivo.	73
4.1.2 Definición del alcance y límites	73
4.2 Análisis del inventario	75
4.2.1 Cálculo de la huella de carbono.	75
4.2.1.1 Huella de carbono bombeo mecánico.	76
4.2.1.2 Huella de carbono bombeo electrosumergible.	77
4.2.1.3 Huella de carbono bombeo cavidades progresivas.	77
4.3 Evaluación del impacto del ciclo de vida	78
4.3.1 Bombeo mecánico.	78
4.3.2 Bombeo Electrosumergible	80
4.3.3 Bombeo Cavidades progresivas.	81
4. 3.4 Impactos ambientales.	81

4.4 Interpretación.....	82
4.4.1 Bombeo mecánico.	83
4.4.2 Bombeo electrosumergible.	84
4.4.3 Bombeo cavidades progresivas.	86
5. Balance energético.....	87
6. Análisis financiero.....	92
7. Conclusiones.....	97
8. Recomendaciones	99
Referencias Bibliográficas	101

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de las unidades de bombeo mecánico.....	28
Tabla 2. Componentes del bombeo electrosumergible.....	30
Tabla 3. Componentes del sistema de bombeo por cavidades progresivas	32
Tabla 4. Rango ideal de funcionamiento de los SLA convencionales.....	35
Tabla 5. Propiedades los casos de estudio	38
Tabla 6. Gravedad específica, densidad del aceite y densidad de la mezcla	39
Tabla 7. Radio de drenaje	39
Tabla 8. Índice de productividad y presión de fondo fluyente	42
Tabla 9. Nivel dinámico y nivel de fluido	43
Tabla 10. Energía consumida por el sistema BM 640 en superficie.....	50
Tabla 11. Corrección de la eficiencia de la bomba por efecto de la viscosidad	57
Tabla 12. Tipo de motor y especificaciones de potencia para BES.....	59
Tabla 13. Conversión de los KVA a Kw	61
Tabla 14. Energía consumida por el sistema BES en superficie.....	62
Tabla 15. Selección del cabezal para casos de estudio	69
Tabla 16. Energía consumida por el sistema PCP en superficie.....	70
Tabla 17. Resultados de potencia de los diseños de los SLA para cada caso.....	72
Tabla 18. Emisiones de acuerdo al alcance 2.	75
Tabla 19. Resultados del cálculo de la huella de carbono para los SLA	79
Tabla 20. Impactos ambientales significativos	82

Tabla 21.Relación entre longitud de stroke y huella de carbono par BXA y CCW	84
Tabla 22.Relación entre longitud de stroke y huella de carbono para CW y Mark II	85
Tabla 23.Relación de bomba y huella de carbono para sistema BES	85
Tabla 24.Energía generada por la combustión de un barril de petróleo	88
Tabla 25.Balance energético para sistema BM.....	89
Tabla 26.Balance energético bombeo electrosumergible	90
Tabla 27.Balance energético Bombeo de cavidades progresivas	90
Tabla 28.Energía consumida por barril de fluido.	91
Tabla 29.Balance financiero Bombeo mecánico.	93
Tabla 30.Balance financiero BES.	94
Tabla 31.Balance financiero PCP.	94
Tabla 32.Inversión por barril producido	95
Tabla 33.Resultados de inversión en energía para los SLA.....	96

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1.Fuente emisoras de gases efecto invernadero.....	22
Figura 2.Pasos generales para el cálculo de la huella de carbono.	24
Figura 3.Cinco fases del ciclo de vida de un producto.	24
Figura 4.Etapas de un ACV.	25
Figura 5.Conjunto de procesos unitarios.	26
Figura 6.Componentes de bombeo mecánico.	29
Figura 7.Componentes del bombeo electrosomergible.....	31
Figura 8.Componentes del bombeo cavidades progresivas.	32
Figura 9.Curva IPR para yacimiento subsaturado..	41
Figura 10.Código de identificación para la unidad convencional.	45
Figura 11.Equipo de superficie bombeo mecánico.....	47
Figura 12.Potencia del motor para caso de estudio 1.....	49
Figura 13.Diagrama de flujo para el diseño del sistema Bombeo mecánico.	49
Figura 14.Carga dinámica total (TDH).	53
Figura 15. Capacidad de elevación (ft).	57
Figura 16.Grafica pérdidas de voltaje para cables eléctricos.....	61
Figura 17.Diagrama de flujo para el diseño del sistema BES.....	62
Figura 18.Selección del elastómero.	66
Figura 19.Modelo de bomba PCP caso de estudio 1.	67
Figura 20.Diagrama de flujo para el diseño del sistema PCP.....	71

Figura 21.Límites del sistema.	74
Figura 22.Diagrama de flujo del sistema.	75
Figura 23.Resultado huella de carbono para bombeo mecánico 640.....	78
Figura 24.Resultado huella de carbono para bombeo mecánico 912.....	80
Figura 25.Huella de carbono generada por el sistema Electrosumergible	80
Figura 26.Huella de carbono emitida por el sistema PCP.	81
Figura 27.Orden de emisiones de CO2 de los sistemas de levantamiento para caso 1.....	83
Figura 28.Relación entre viscosidad y huella de carbono para PCP.....	86

Lista de Apéndices

(Ver apéndices adjuntos en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS)

Apéndice A. Macro de Excel, Análisis Huella de Carbono en SLA.

Apéndice A-1. *Screening* Ideal.

Apéndice A-2. Casos de estudio

Apéndice A-3. Poder calorífico

Apéndice A-4. BM 640

Apéndice A-5. BM 912

Apéndice A-6. BES

Apéndice A-7. PCP

Apéndice A-8. Graficas

Apéndice A-9. Salidas de datos

Apéndice A-10. Sensibilidad de variables

Apéndice A-11 Análisis económico y energético

Apéndice B. Catálogo de productos Borets International, Electric Submersible Pump Technology

Apéndice C. Catálogo de productos Netzsch, Manual de Sistemas PCP

Apéndice D. Norma ANSI/HI 9.6.7-2010

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO PRODUCIDA POR LOS SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL CONVENCIONALES, EN UN CAMPO COLOMBIANO*

AUTORES: MARÍA ALEJANDRA MARTÍNEZ DURÁN

CATALINA USECHE NARVÁEZ**

PALABRAS CLAVE: EMISIONES DE DIOXIDO DE CARBONO, HUELLA DE CARBONO, BALANCE ENERGÉTICO, SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL.

DESCRIPCIÓN:

En el área de producción de hidrocarburos, a la hora de diseñar un sistema de levantamiento artificial para un pozo, se tienen en cuenta criterios técnicos y financieros, dejando de lado otro tipo de criterios como los ambientales, tales como la huella de carbono; por tal motivo establecer un valor de emisiones de dióxido de carbono de los diferentes sistemas de levantamiento artificial convencionales brinda un beneficio, no solo para el sector petrolero sino también para el mundo debido a que permite en un futuro plantear objetivos enfocados a reducir emisiones de gases efecto invernadero.

Durante el desarrollo de este proyecto, se encontrará información relacionada con propiedades de pozos tipo representativos en las cuencas con mayor producción del país, una metodología aplicada para el diseño de los sistemas más usados en Colombia: bombeo mecánico, electrosumergible y cavidades progresivas, con base en las condiciones del campo previamente seleccionado; de igual manera se evidenciará el modelo matemático implementado para el cálculo de las emisiones de dióxido de carbono y así mismo información relacionada con el marco metodológico utilizado para evaluar la huella de carbono emitida indirectamente durante el funcionamiento de los sistemas y finalmente un análisis energético y financiero que permite concluir cuál sistema es más amigable con el medio ambiente.

* Trabajo de grado.

** Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de ingeniería de petróleos. Director: M.Sc Erik Giovany Montes Páez.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF THE CARBON FOOTPRINT PRODUCED BY CONVENTIONAL ARTIFICIAL LIFT SYSTEMS, IN A COLOMBIAN FIELD*

AUTHORS: MARÍA ALEJANDRA MARTÍNEZ DURÁN

CATALINA USECHE NARVÁEZ**

KEYWORDS: CARBON DIOXIDE EMISSIONS, CARBON FOOTPRINT, ENERGY BALANCE, ARTIFICIAL LIFT SYSTEMS.

DESCRIPTION:

In the area of hydrocarbon production, when designing an artificial lift system for a well, technical and financial criteria are taken into account, leaving aside other types of criteria such as the environmental ones, such as the carbon footprint; For this reason, establishing a carbon dioxide emission value of the different conventional artificial lifting systems provides a benefit, not only for the oil sector but also for the world because it allows in the future to raise Objectives focused on reducing greenhouse gas emissions.. During the development of this project, it will be found information related to properties of type Wells representative in the basins with the highest production of the country, a methodology applied for the design of the most used systems in Colombia: mechanical pumping, Electrosubmersible and progressive cavities, based on the conditions of the previously selected field; Similarly, the mathematical model implemented for the calculation of carbon dioxide emissions will be shown, as well as information related to the methodological framework used to evaluate the carbon footprint indirectly emitted during the Operation of the systems and finally an energetic and financial analysis that allows to conclude which system is friendlier with the environment.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physic-Chemistry Engineering. Petroleum engineering school. Director: M.Sc Erik Giovany Montes Páez.

Introducción

En el área de producción de hidrocarburos, a la hora de seleccionar el sistema de levantamiento artificial (SLA) adecuado para un pozo, se tienen en cuenta criterios técnicos y financieros, por lo cual este proyecto busca generar una iniciativa en la industria al incluir un parámetro ambiental, el cuál es la huella de carbono, definida como la cantidad de emisiones de gas efecto invernadero (GEI) asociadas a una empresa, evento, actividad, servicio o producto. Esta cantidad de emisiones es un aspecto vital en la lucha contra el calentamiento global, en protocolos ambientales de la ONU como el de Kioto, se establece como medida para controlar, evaluar y posteriormente reducir dicho cambio.

Por lo tanto para desarrollar este proyecto, primero se realizó una recopilación bibliográfica relacionada a las metodologías de evaluación de huella de carbono y sobre el diseño de los sistemas de levantamiento artificial bombeo mecánico, bombeo electrosurgible y bombeo de cavidades progresivas.

Segundo, se configuraron cuatro pozos tipo en diferentes cuencas sedimentarias de Colombia y tercero se procedió a realizar el diseño de los sistemas de levantamiento, buscando como variable clave la energía necesaria en superficie para el funcionamiento del sistema.

Cuarto, se realizó el cálculo de la huella de carbono con base en la metodología del análisis del ciclo de vida (ACV) para los sistemas de levantamiento, cuando estos están en fase de uso y con ayuda de una plantilla en Excel generada durante el proyecto para el cálculo de las emisiones de dióxido de carbono.

Quinto, con los resultados obtenidos se procedió a realizar un análisis financiero y energético con el fin de resaltar el hecho de que a menor producción de huella de carbono, menor será la inversión en energía, lo cual significaría que si se reduce el impacto ambiental se reducen costos de la operación.

Finalmente, se logró evidenciar cuál sistema genera mayor impacto al medio ambiente y se deja abierta la posibilidad de continuar con este estudio, ahora con la oportunidad de buscar optimizar los SLA y reducir la huella de carbono producida.

1. Fundamento teórico

1.1 Huella de carbono

La huella de carbono es un parámetro utilizado para medir la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) originadas ya sea en forma directa o indirecta por una empresa, evento, actividad, o durante el ciclo de vida de un producto o servicio (Atance, Marin, Uranga y Luengo, 2012).

Las emisiones directas son las que se liberan en el lugar donde se produce la actividad, mientras que las emisiones indirectas son causadas por el desarrollo de la actividad pero estas emisiones provienen de fuentes que no están en el lugar, por ejemplo, el uso de la electricidad.

El Protocolo de Kioto considera seis tipos de gases GEI conocidos como CO₂, CH₄, N₂O, PFCs, HFCs y SF₆ lo cual lleva, a que la medición de la huella de carbono corresponda a un inventario de GEI expresado en toneladas de CO₂ equivalente.

La huella de carbono no solo sirve para cuantificar las emisiones de GEI sino que también permite detectar y delimitar las fuentes emisoras como se observa en la figura 1, para ello se han establecido tres alcances:

Alcance 1: “Emisiones directas de GEI provenientes de fuentes controladas por la organización” (Carvajal, 2012, P.34).

Alcance 2: “Emisiones indirectas que ocurren por fuera de la organización, a partir de recursos externos importados, como la electricidad, calor o vapor” (Carvajal, 2012, P.34).

Alcance 3: “emisiones indirectas expandidas que ocurren fuera de la organización a partir de fuentes no pertenecientes o controladas por la misma, pero que están ligadas a sus actividades” (Carvajal, 2012, P.34).

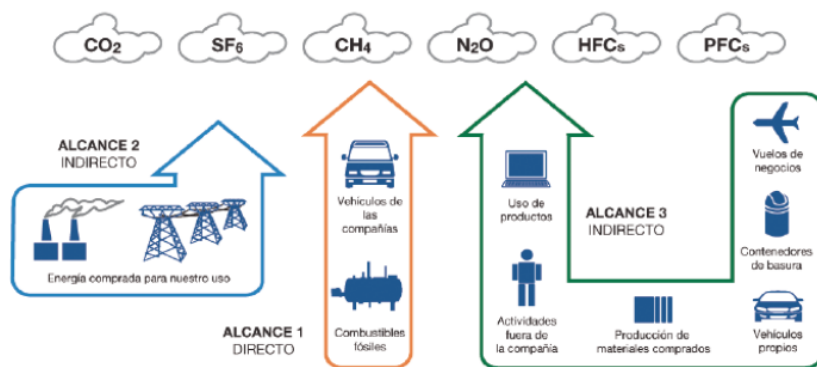


Figura 1. Fuente emisoras de gases efecto invernadero. Adaptado de Atance et al., (2012).

La medición de la huella de carbono genera una perspectiva del impacto ambiental, con base en esto se puede implementar estrategias para la reducción de las emisiones GEI y por consiguiente mitigar el calentamiento global, además da la oportunidad de modificar o crear productos y servicios que sean más amigables con el medio ambiente en cuanto a emitir una menor cantidad de GEI a diferencia de lo que se produce actualmente.

1.1.1 Marcos metodológicos internacionales

En la actualidad existen diversas referencias y normas para el cálculo de huella de carbono, pero no se cuenta con un marco metodológico de medición común y uniforme que se adapte a proyectos específicos y responda a criterios y procesos de aprobación propios (Atance et al., 2012, P.9).

Sin embargo, Atance et al. (2012) mencionan marcos metodológicos que están dirigidos concretamente al cálculo de la huella de carbono de productos, compañías y eventos.

a) Huella de carbono para empresas

- Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol): Estándar Corporativo de Contabilidad y Reporte del Protocolo de GEI.

- ISO 14064: Gases de Efecto Invernadero (GEI).

b) Huella de carbono para productos

- Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol): Estándar de Contabilidad y Reporte del Ciclo de Vida de Productos del Protocolo de GEI.

- Norma PAS 2050: Norma para la Gestión de Huella de Carbono.

- ISO 14067: Huella de Carbono de Productos.

- ISO 14040 y 14044: Análisis del ciclo de vida

c) Demostración de la Neutralidad de Carbono

- Norma PAS 2060: Neutralización y Reducción de Huella de Carbono.

1.1.2 Cálculo de la huella de carbono

El cálculo de la huella de carbono se basa en cinco pasos como los evidenciados en la figura 2, estos pasos se aplican en la mayoría de los casos para realizar la medición de la huella, Sin embargo, la sociedad Pública de Gestión Ambiental (Ihobe, 2012) afirma que la sistemática de cálculo y la forma de desarrollar cada paso difiere en función de si se realiza la huella de carbono de un producto o servicio, o de una organización.

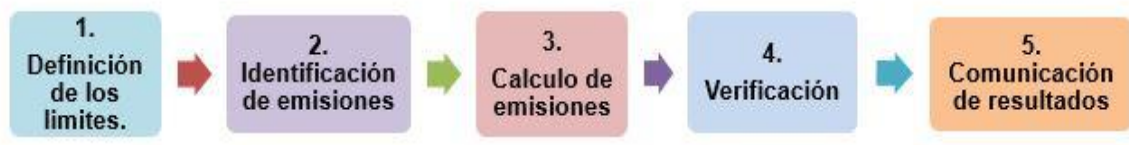


Figura 2. Pasos generales para el cálculo de la huella de carbono. Adaptado de Ihobe (2012).

Evaluar la huella de carbono producida por un sistema de levantamiento artificial corresponde a medir las emisiones de GEI para un producto, por consiguiente esta medición se realiza con base al análisis del ciclo de vida (ACV) del sistema de levantamiento.

El ciclo de vida de un producto comprende las etapas desde la obtención de la materia prima hasta que se convierte en residuo (Ihobe, 2012). La figura 3 evidencia claramente las fases del ciclo de vida comprendidas por el protocolo GHG.

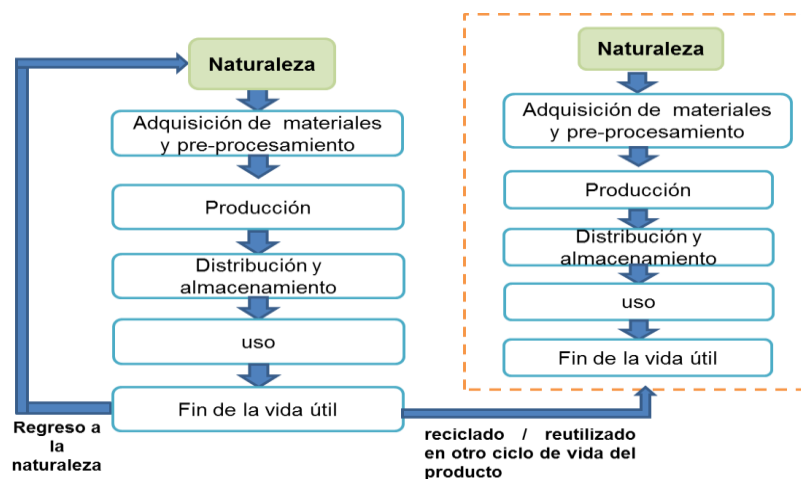


Figura 3. Cinco fases del ciclo de vida de un producto. Adaptado GHG protocol. Recuperado de <http://www.ghgprotocol.org/product-standard>.

De igual manera para evaluar la huella de carbono producida por los sistemas de levantamiento se debe realizar el desarrollo del análisis del ciclo de vida o conocer la metodología del ACV y para esto se deben seguir unas etapas o fases con base en la norma técnica colombiana (NTC) ISO 14040. Son cuatro fases las que componen un estudio ACV y la relación entre cada una de ellas se observa en la figura 4.

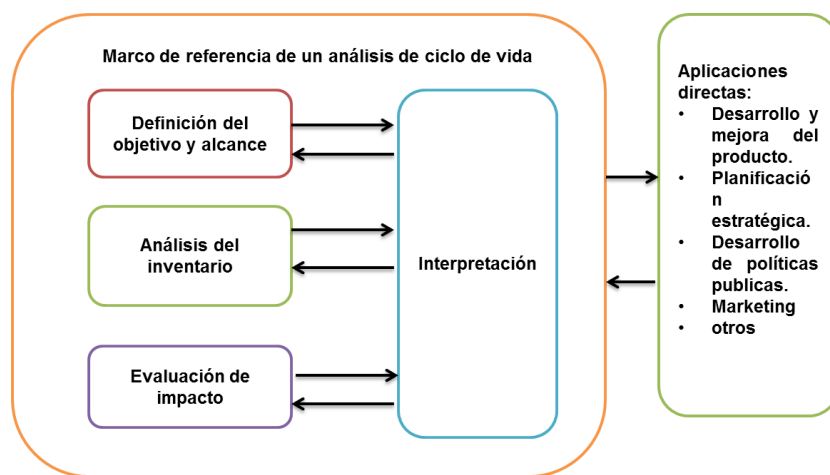


Figura 4. Etapas de un ACV. Adaptado de Norma técnica colombiana NTC-ISO 14040 (2007)

La NTC ISO 14040 (2007) define las etapas metodológicas de un ACV:

1. Definición del objetivo y alcance: para establecer el objetivo se debe exponer las razones para realizar el estudio, la aplicación prevista y el público previsto. Así mismo para el alcance se debe tener en cuenta el sistema del producto, la unidad funcional, los límites del sistemas y suposiciones, de tal manera que al establecerlo este esté lo suficientemente bien definido para asegurar la amplitud, profundidad y el nivel de detalle del estudio y así mismo asegurar compatibilidad para alcanzar el objetivo.

2. Análisis de inventario de ciclo de vida (ICV): esta etapa implica la recopilación de los datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas de un sistema del producto.

El sistema de un producto es un conjunto de procesos unitarios vinculados entre sí por flujos de productos intermedios. La división de dicho sistema en los procesos unitarios facilita la identificación de las entradas y salidas del sistema. En la figura 5 se muestra un ejemplo de un conjunto de procesos unitarios dentro de un sistema de producto.

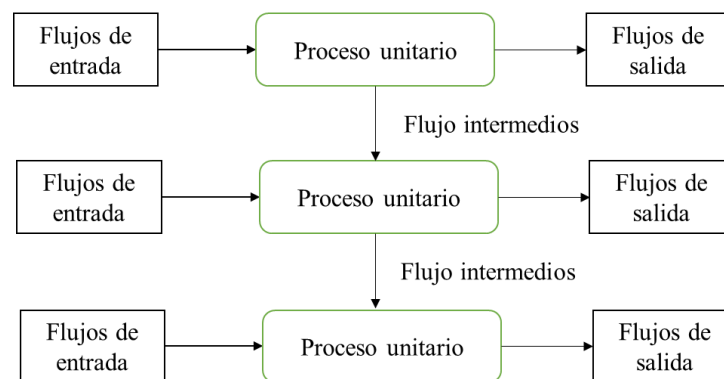


Figura 5. Conjunto de procesos unitarios. Adaptado de NTC ISO 14040

La base metodológica para los procedimientos de cálculo de la huella de carbono en este proyecto se hará con la ecuación 1:

$$\text{Huella de carbono} = \text{Dato de la actividad} \times \text{factor de emisión} \quad (1)$$

Donde:

El dato de actividad, es el parámetro que define el grado o nivel de la actividad generadora de las emisiones de GEI.

El factor de emisión (FE) supone la cantidad de GEI emitidos por cada unidad del parámetro “dato de actividad”. Estos factores varían en función de la actividad que se trate.

3. Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV): esta etapa tiene como propósito evaluar cuán significativos son los impactos ambientales potenciales utilizando los resultados del ICV.
4. Interpretación: los análisis del inventario y de la evaluación de impacto se consideran en conjunto. La fase de interpretación debe proporcionar resultados que sean coherentes con el objetivo y los alcances definidos para que lleven a conclusiones y posteriormente a recomendaciones.

Teniendo en cuenta la metodología anteriormente definida por la NTC ISO 14040 se hará el ACV de los sistemas de levantamiento artificial convencionales y así mismo se concluirá con el cálculo de la huella.

1.2 Sistemas de levantamiento artificial convencionales

1.2.1 Bombeo mecánico

El sistema de levantamiento artificial bombeo mecánico, es usado tanto en la producción de crudos pesados como en la de extrapesados, medianos y livianos. El método consiste en la instalación de una bomba de subsuelo de acción reciprocante que es abastecida con energía

transmitida a través de una sarta de varillas; esta energía proviene a su vez de un motor eléctrico o de combustión interna el cual moviliza la unidad de superficie mediante un sistema de engranajes y correas (Escalante, 2016).

De igual manera, las unidades de bombeo mecánico se clasifican según su geometría en unidades convencionales, unidades neumáticas y unidades Mark II; en la tabla 1 se describen cada una de las unidades.

Tabla 1.

Clasificación de las unidades de bombeo mecánico.

Tipo de unidad	Punto de apoyo	Mecanismos de contrabalance
Convencional	Punto medio del balancín	Por contrapeso
Neumática	Extremo delantero del balancín	Por aire
Mark II	Extremo trasero del balancín	Por contrapeso

Nota. Adaptado de Muñoz, A y Torres, E (2007). Evaluación técnica de las estrategias de levantamiento artificial implementadas en campos maduros. Diseño de una herramienta software de selección. Universidad Industrial de Santander.

El bombeo mecánico está conformado por componentes que se pueden clasificar en equipos de superficie y equipos de subsuelo, en la figura 6 se observa las partes de este sistema de levantamiento.

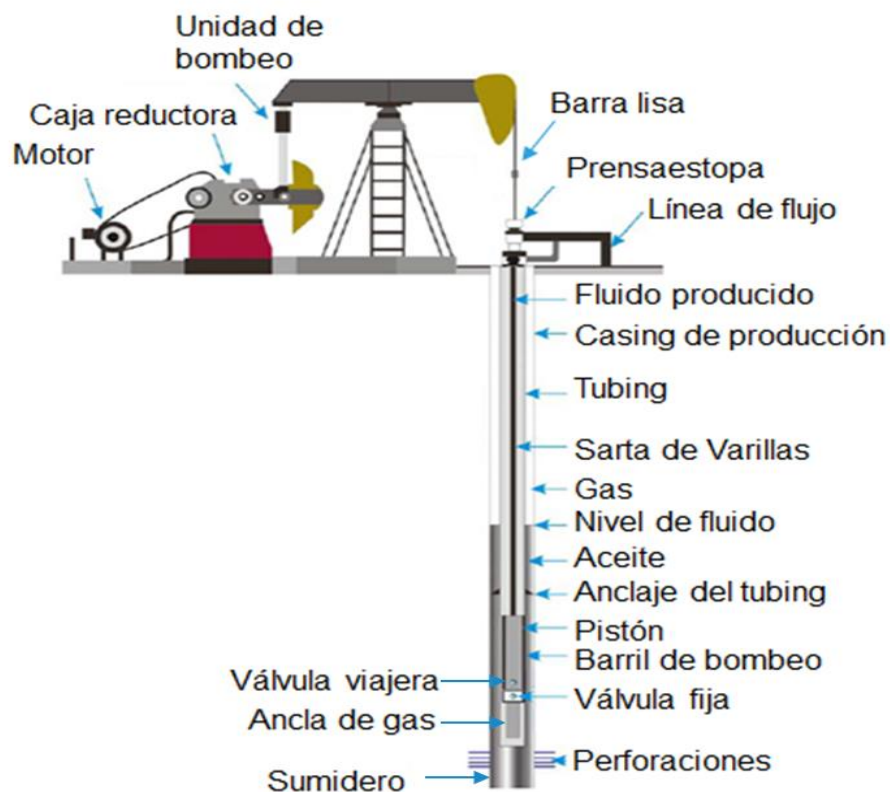


Figura 6. Componentes de bombeo mecánico. Adaptado de Muñoz, Á., & Torres, E. (2007).

1.2.2 Bombeo electrosumergible

El bombeo electrosumergible (BES o ESP por sus siglas en inglés), es un sistema de levantamiento artificial que tiene como principio fundamental levantar el fluido desde el yacimiento hacia la superficie, mediante rotación centrífuga de los impulsores de la bomba, lo que permite que el fluido ascienda a través de las etapas de los impulsores y llegue a la superficie (estación recolectora), con suficiente energía. La potencia requerida por la bomba electrosumergible es suministrada por un motor eléctrico acoplado al eje de la bomba, el cual está ubicado en el fondo del pozo, y la corriente eléctrica requerida se suministra a través del cable de

potencia el cual está fijado a la tubería de producción que soporta el sistema de fondo y conecta el motor a la superficie (Arismendi y Harrysong, 2007).

El BES está conformado por partes que se clasifican en equipo de superficie y de subsuelo; en la tabla 2 se describen cuáles son esas partes que conforman dicha clasificación; De igual forma en la figura 7 se muestra el equipo completo que conforma al BES.

Tabla 2.
Componentes del bombeo electrosumergible

Equipo de superficie	Equipo de subsuelo
Ensamblaje de cabeza de pozo	Unidad de bombeo centrífugo
Caja de empalme	Camisa de la bomba
Panel de controles	Separador de gas (Opcional)
Transformador	Unidad sellante protectora del motor
Variador de frecuencia	Motor eléctrico
Cable eléctrico	Herramienta de monitoreo de fondo (opcional)

Nota. Adaptado de Muñoz, A y Torres, E (2007). Evaluación técnica de las estrategias de levantamiento artificial implementadas en campos maduros. Diseño de una herramienta software de selección. Universidad Industrial de Santander.

El BES se aplica normalmente en dos principales situaciones, las cuales son:

1. Pozo de alto corte de agua.
2. Pozos que producen fluidos altamente viscosos.

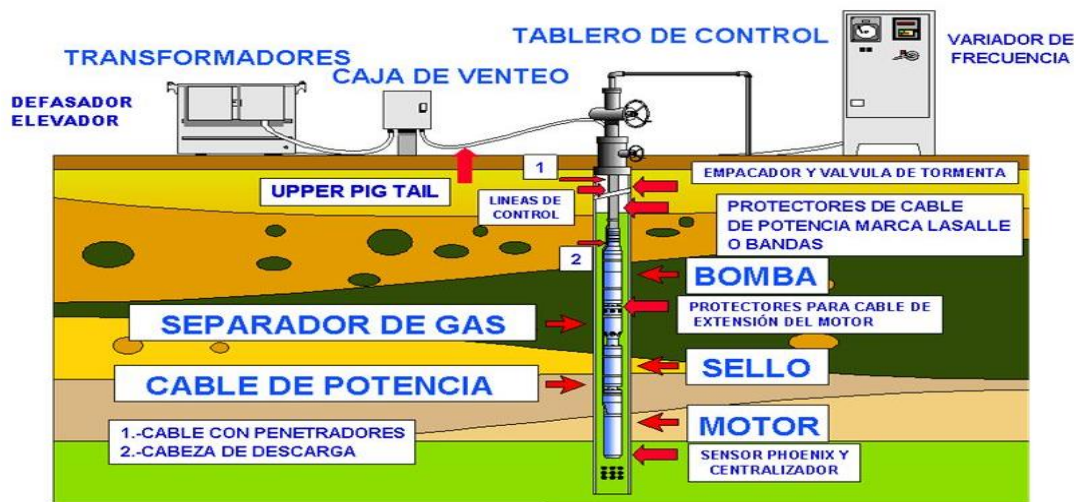


Figura 7. Componentes del bombeo electrosumergible. Recuperado de: http://producciondecrudoextrapesado.blogspot.com.co/p/blog-page_1.html

1.2.3 Bombeo de cavidades progresivas

Las bombas de cavidades progresivas son bombas de desplazamiento positivo que consisten en un rotor de acero helicoidal y un elastómero sintético pegado a un tubo de acero. El estator se instala en el pozo conectado al fondo de la tubería de producción, a la vez que el rotor está conectado al final de la sarta de varillas. La rotación de ésta sarta desde superficie por el accionamiento de una fuente de energía externa, permite el movimiento giratorio del rotor dentro del estator fijo por lo cual permite que el fluido se desplace verticalmente hacia la superficie del pozo (Monsalve Duarte, 2015).

Las configuraciones del sistema pueden variar dependiendo del fabricante; sin embargo existen componentes principales como la bomba PCP (Estator y rotor) para el equipo de subsuelo y cabezal, motor y variador para el equipo de superficie (Rodríguez y Robles, 2010). En la figura 8 y tabla 3 se observan los componentes de ese sistema de levantamiento.

Tabla 3.

Componentes del sistema de bombeo por cavidades progresivas

Equipo de subsuelo	Equipo de superficie
Ancla Antitorque	Cabezal de rotación
Pin de Paro (Back Stop Pin)	Motor Eléctrico
Estator	Relación de Transmisión
Rotor	Te de Producción
Sarta de Varillas	Barra Lisa
Tubería de Producción	Stuffing Box

Nota. Adaptado de Monsalve Duarte, D. A. (2015). *Evaluación técnica y financiera de la implementación de nuevas tecnologías para la mejora del rendimiento de los sistemas de levantamiento artificial de bombeo por cavidades progresivas*. Tesis. Bucaramanga.

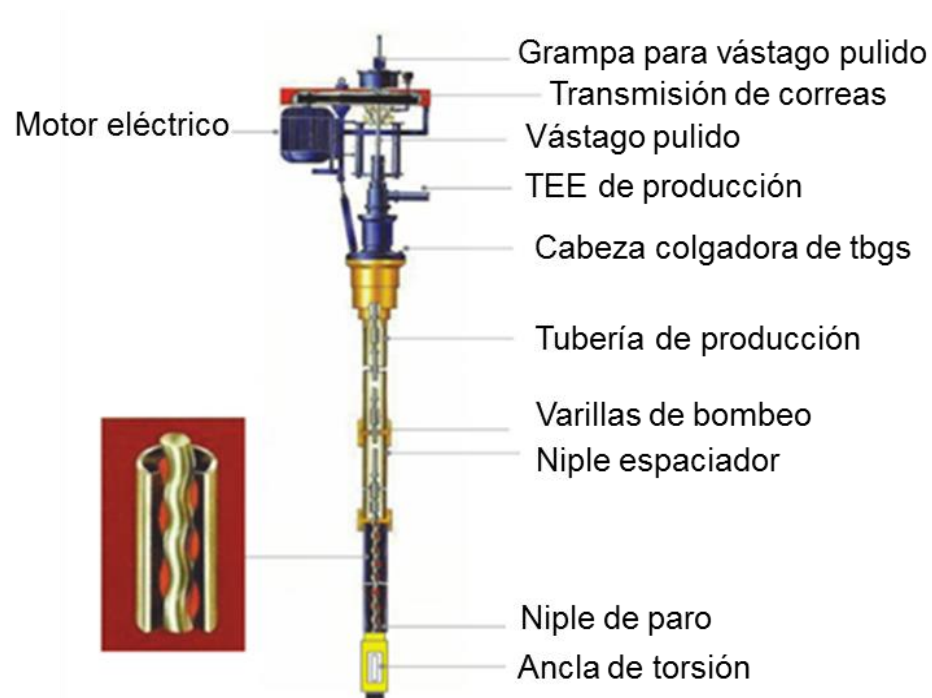


Figura 8. Componentes del bombeo cavidades progresivas. Adaptado de Naranjo Mena, 2017.

2. Casos de estudio

Este proyecto tiene un enfoque nacional, por lo cual se estableció cuatro casos de estudio que corresponden cada uno a una cuenca sedimentaria de Colombia, para este proceso se recopiló información suficiente de tal manera que se pudiera escoger las cuencas que representarían respectivos casos.

2.1 Metodología de selección

La agencia nacional de hidrocarburos (ANH,2011) establece las cuencas sedimentarias, siendo los Llanos Orientales la cuenca con mayor producción con el 67.6% de crudo en el país, esta posee una gran gama de tipos de crudo, en su mayoría crudo liviano; el Valle Medio del Magdalena es la segunda cuenca con más producción de aceite con un porcentaje del 14.6%, la cual cuenta con un amplio rango de variedad de crudos pero mayormente de crudo medio a pesado; la cuenca del valle superior del Magdalena posee un crudo entre mediano y pesado y es la tercera cuenca con más producción 9.7%; finalmente se tiene la cuenca del Catatumbo siendo esta la quinta productora de aceite del país (0.43%) con un crudo en su mayoría liviano.

Para seleccionar los casos de estudio fue necesario realizar un trabajo de recolección de datos de textos, artículos y trabajos de grados correspondientes a propiedades de campos y pozos de cada una de las cuencas colombianas y con base en la información recopilada se seleccionaron las cuencas más representativas e importantes de Colombia.

Por consiguiente para el desarrollo de este proyecto se tomó como caso de estudio 1 la cuenca de los Llanos Orientales, como caso 2 el valle medio del magdalena (VMM), caso 3 valle superior del magdalena (VSM), y finalmente como caso 4 la cuenca del Catatumbo.

2.2 Criterios de selección ideal

Ya definidos los casos se procedió a realizar una revisión de los *screening* para los distintos sistemas de levantamiento artificial, se realizó una comparación y con base en esos criterios, se creó un modelo ideal como se muestra en la tabla 4, de tal forma que se pudiera establecer unos rangos de aplicabilidad de los datos buscados de las cuencas para el diseño de los sistemas de levantamiento artificial convencionales.

Con respecto al modelo ideal se realizó el trabajo de comparación de datos entre el caso ideal y las cuencas seleccionadas, se realizó una tabla (ver tabla 5) de los casos de estudio con sus respectivas propiedades y datos, se verificó que estos estuvieran dentro del rango ideal y de igual manera se brindó flexibilidad en propiedades como el BSW y el GOR ya que no presentaban una limitante en el diseño de los sistemas de levantamiento, es decir, esta tabla se ajustó para que cumpliera con los requisitos de los tres sistemas de levantamiento a diseñar, bombeo mecánico, bombeo electrosumergible y bombeo de cavidades progresivas.

2.3 Determinación de propiedades

Además de la información recopilada de las cuencas de la tabla 5, fue necesario realizar unos cálculos de algunas propiedades de campo con el fin de darle continuidad al diseño de los sistemas

de levantamiento artificial convencionales. A continuación se muestra los caculos de dichas propiedades.

Tabla 4.

Rango ideal de funcionamiento de los SLA convencionales

	IDEAL
Numero de pozos	>1
Tasa de producción (Bls/d)	300-3500
Profundidad pozo (ft)	<10000
Tamaño de Casing (in ID)	7
Grado de Inclinación pozo (° con respecto a la vertical)	<8
Severidad del Dogleg (ft/100ft)	0-5
Temperatura (°F)	1-200
Presión de yacimiento	0-4000
Tipo de completamiento	SIMPLE
Tipo de recobro (1rio - 2rio - 3rio)	PRIMARIO
BS&W (%)	0-55%
Viscosidad del fluido producido (cp)	101-200
Presencia de fluidos corrosivos	NO
Contenido de arena abrasiva (ppm)	1-10
GOR (scf/stb)	0-220
Presencia de Contaminantes	MEDIA
Tratamientos Aplicados (Inhib. - Solv. - Acidos)	SIN TRATAMIENTOS
Tipo de Locación	ON SHORE

Nota. Adaptado de Muñoz, a. f., & Edgar, t. (2007). Evaluación técnica de las estrategias de levantamiento artificial implementadas en campos maduros. Diseño de una herramienta software de selección. Tesis. Bucaramanga: UIS.

2.3.1 Gravedad específica, densidad del aceite y densidad de la mezcla. La gravedad específica del aceite se determinó usando la ecuación de API la cual es $GE = 141.5 / (131.5 + \text{Api}^\circ)$.

Utilizando la definición de gravedad específica y tomando como densidad de referencia para el agua 8.33 (lb/gal) se encontró la densidad del aceite de la siguiente manera $\delta_o = GE * 8.33$.

Así mismo, para encontrar la densidad de la mezcla (δm), se relaciona la densidad del agua y del crudo (δo) con el porcentaje de agua presente en el fluido, de tal manera que la δm se determina como sigue $\delta m = \delta o(1 - BSW) + 8.33(BSW)$.

A continuación en la tabla 6 se muestran los resultados del cálculo de las propiedades mencionadas para cada uno de los casos de estudio teniendo en cuenta la información anteriormente recopilada como el API.

2.3.2 Índice de productividad, presión de fondo fluyente. Se asumió que todos los casos de estudio se encuentran en régimen Pseudoestable con el fin de determinar un índice de productividad. Antes de seleccionar el método de levantamiento a implementar en un campo en particular es necesario conocer el paso de fluidos desde la formación hacia el pozo así como la tasa de producción. (Muñoz y Torres, 2007).

Cuando se desea tener una tasa de producción que la formación con su energía natural no puede entregar se recurre a algún método de levantamiento artificial para obtenerla. En general, cualquier método de levantamiento artificial tiene por objeto disminuir P_{wf} lo cual implica un aumento de caudal (q), este aumento de q dependerá del índice de productividad (Naranjo Agudelo, A. D. J).

El índice de productividad (J) que se calculó para cada caso de estudio, se hizo utilizando la ecuación 2 para régimen pseudoestable

$$J = \frac{kh}{141.2\beta_o\mu} \left(\ln \left(\frac{0.472re}{rw} \right) + s \right)^{-1} \quad (2)$$

Dónde:

J = Índice de productividad

k = permeabilidad del aceite

h = espesor de la formación

β_o = factor volumétrico del aceite

μ = viscosidad del aceite

r_e = radio de drenaje

r_w = radio del pozo

s = daño

En la ecuación 2 fue necesario determinar propiedades como la viscosidad del aceite, el radio de drenaje y el radio del pozo. Por consiguiente, para calcular la viscosidad del aceite a condiciones de yacimiento se utilizó la correlación de H.D Beggs y J.R Robinson.

$$\mu = 10^x - 1 \quad (3)$$

$$x = yt^{-1.163} \quad (4)$$

$$y = 10^z \quad (5)$$

$$z = 3.0324 - 0.02023(API^\circ) \quad (6)$$

Para el cálculo del radio de drenaje (r_e) fue necesario consultar el espaciamiento entre pozos recomendado según el tipo de crudo (si es liviano o pesado) y así mismo con la formula $A = \pi r^2$ se despejó el radio mencionado (tabla 7).

Tabla 5.

Propiedades los casos de estudio

	Caso 1 (Llanos Orientales)	Caso 2 (VMM)	Caso 3 (VSM)	Caso 4 (Catatumbo)
Numero de pozos	1	1	1	1
Tasa de producción (Bls/d)	300	300	300	300
Profundidad pozo (ft)	8000	8200	7000	5000
Diámetro de Casing (in OD)	7	7	7	7
Grado de Inclinación pozo (grados con respecto a la vertical)	0	0	0	0
Severidad del Dogleg (ft/100ft)	0	0	0	0
Temperatura (°F)	185	116	152	120
Presión de yacimiento	3500	3670	2800	2210
Presión de burbuja (psi)	1800	1228	1700	1650
Tipo de completamiento	Simple	Simple	Simple	Simple
Tipo de recobro	Primario	Primario	Primario	Primario
BS&W (%)	90	30	15	44
Presencia de fluidos corrosivos	No	No	No	No
Contenido de arena abrasiva (ppm)	No	No	No	No
GOR (scf/stb)	10	600	250	120
Presencia de Contaminantes	No	No	No	No
Tratamientos Aplicados (Inhib. - Solv. - Acidos)	No	No	No	No
Tipo de locación	On shore	On shore	On shore	On shore

Tabla 6.
Gravedad específica, densidad del aceite y densidad de la mezcla

Propiedades	Caso1 (llanos orientales)	Caso 2 (VMM)	Caso 3 (VSM)	Caso 4 (Catatumbo)
API	8	20	18	32
GE	1,01	0,93	0,95	0,87
Densidad del aceite (Lbs/Gal)	8,45	7,78	7,88	7,21
Densidad de la mezcla (Lbs/Gal)	8,45	7,78	7,88	7,21

Por otro lado, para calcular del radio del pozo (r_w) se tuvo en cuenta el diámetro del casing, el cual es de 7" para todos los casos de estudio, por tal motivo se asumió que el diámetro de los pozos es de 10" y aplicando la formula $r = D/2$ se determinó el valor de radio de los pozos, el cual se puede observar en la tabla 8.

Tabla 7.
Radio de drenaje

Casos	Espaciamento $A = \pi r^2$	Radio de drenaje (re)		
1	45	acres	789,91	ft
2	5	acres	263,30	ft
3	20	acres	526,60	ft
4	40	acres	744,73	ft

La presión de producción en el fondo del pozo, P_{wf} , se conoce como FBHP (flowing bottom hole pressure) y la diferencia entre esta y la presión del yacimiento (P_y) se conoce como drawdown (Muñoz y torres, 2007). $Drawdown = \Delta P = P_y - P_{wf}$.

La relación entre la tasa de producción de un pozo y el drawdown para una tasa particular, se denomina índice de productividad (Muñoz y torres, 2007).

$$J = \frac{q}{P_s - p_{wf}} \quad (7)$$

Por consiguiente, con los valores de índice de productividad (J) anteriormente determinados mediante la ecuación 2, se procede a reemplazar este valor, junto con la tasa de producción y la presión del yacimiento en la ecuación 7 para de esta forma determinar la P_{wf} .

De igual manera, otra forma de determinar la P_{wf} es mediante la curva IPR, este es un gráfico P_{wf} vs q , el cual da a conocer el comportamiento de la formación productora, indicando que presión debe haber en el fondo del pozo (P_{wf}) cuando la formación está entregando una cantidad determinada de fluidos (q); o lo contrario, a través de la IPR se puede saber si la presión en el fondo del pozo es P_{wf} , cual es la cantidad de fluido que está saliendo de la formación (Naranjo Agudelo, A. D. J).

El índice de productividad (J) de un pozo tiende a ser constante, mientras que la gráfica IPR dependerá del comportamiento de la presión del yacimiento, si se encuentra por arriba o por debajo de la presión de burbuja (P_b). Así mismo, todos los casos de estudio de este proyecto tienen una presión de burbuja menor a la presión de yacimiento (P_y), por lo tanto estos casos son yacimientos

subsaturados los cuales su curva IPR representa una tendencia de una línea recta como se observa en la figura 9.

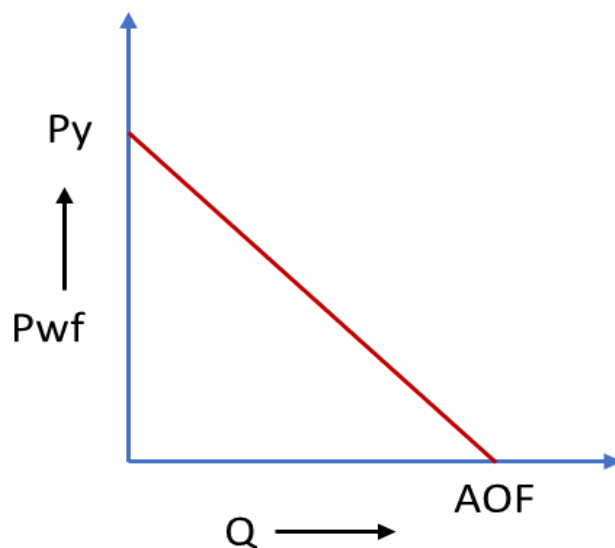


Figura 9. Curva IPR para yacimiento subsaturado. Adaptado de Raya Rogelio (2008).

Además, en la tabla 8 se presentan los valores de J y P_{wf} hallados para cada caso de estudio, tomando los datos de tasa de producción y presión de yacimiento de la tabla 5.

2.3.3 Nivel dinámico y nivel de fluido. El Nivel Dinámico es la altura de los fluidos en el anular del pozo una vez que la tasa de producción se ha estabilizado (Partidas, 2003).

Para determinar el nivel dinámico de los casos de estudio se utilizó la fórmula $P_{wf} = CHP + (0,433 * GE * h_{dinamica})$ donde se despejó h que representa el nivel dinámico. La CHP es la presión en el anular, por lo cual si un pozo produce gas se asume una CHP de 100 a 200 psi, por el contrario si es un pozo con crudo pesado con poca producción de gas la CHP es de 0 psi.

Tabla 8.

Índice de productividad y presión de fondo fluyente

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Ko (mD)	100	150	100	30
h (ft)	340	150	220	100
Bo	1,08	1,04	1,21	1,1
μ (cp)	50,68	47,52	21,46	7,44
re (ft)	526,60	263,30	744,73	789,91
rw (ft)	0,42	0,42	0,42	0,42
S	0	0	0	0
Porosidad	9%	28%	11%	17%
J	0,69	0,57	0,89	0,38
Pwf	3064,57	3139,85	2463,16	1423,81

Así mismo, para determinar el nivel de fluido (NoFo) se utilizó la ecuación $NoFo = PMP - h_{dinamica}$, donde PMP es el punto medio de perforados y $h_{dinamica}$ es el nivel dinámico determinado anteriormente. El punto medio de perforados (PMP) para este proyecto se determinó como $PMP = prof.pozo - (h/2)$ donde h es el espesor de la formación; a continuación en la tabla 9 se muestran los resultados del nivel de fluido y la altura dinámica para cada uno de los casos de estudio.

Tabla 9.
Nivel dinámico y nivel de fluido

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
CHP	0	60	45	120
PMP	7830	8125	6890	4950
Nivel dinámico (ft)	6978,39	7613,88	5899,90	3476,89
Nivel del fluido (ft)	851,61	511,12	990,09	1473,12

3. Diseño de los sistemas de levantamiento artificial

En este capítulo se describirá el diseño de los sistemas de levantamiento artificial (SLA) bombeo mecánico, bombeo electrosurgible y bombeo por cavidades progresivas, aplicando los casos de estudio diseñados en el capítulo 2; estos tres sistemas se seleccionaron teniendo en cuenta que son los SLA más utilizados en Colombia. Los sistemas de levantamiento diseñados se implementarán en los cuatro escenarios con el fin de determinar la energía necesaria que consume cada equipo en superficie y así evaluar la huella de carbono.

Para realizar el diseño de los sistemas de levantamiento artificial se tuvo en cuenta que las propiedades del pozo no afectarán la eficiencia de los sistemas, por lo tanto, es importante aclarar que para llevar este procedimiento a un caso real es necesario tener presente respectivas propiedades para evitar trabajar con un sistema ineficiente; por ejemplo para el sistema BES una tasa de producción baja significa que la bomba trabajará con menor eficiencia y para bombeo

mecánico una desviación muy pronunciada del pozo afectaría la vida útil de la varilla y tubería de producción por consiguiente el sistema trabajaría a menor eficiencia.

3.1 Bombeo mecánico

El objetivo al diseñar el sistema de bombeo mecánico es uno solo: seleccionar adecuadamente los equipos que conforman el sistema para lograr equilibrio entre el aporte del yacimiento a las condiciones establecidas y la capacidad del sistema total (sub-suelo y superficie) de manera que el costo de levantamiento sea el menor posible en las condiciones actuales y futuras del pozo (Escalante, 2016).

El diseño de este sistema de levantamiento se fundamentó en el método API RP 11L y fue necesario conocer en primer lugar la tasa de producción deseada y en segundo lugar las condiciones bajo las cuales se producirá la respectiva tasa; esas condiciones corresponden a los parámetros establecidos y determinados en el capítulo 2.

De igual manera, para realizar este diseño fue necesario establecer otros parámetros como la profundidad y presión de la bomba, tipo y API de la unidad, longitud del stroke, tasa máxima de stroke y la tasa para producir 300 Bls/d (SPM).

3.1.1 Profundidad de la bomba. Para determinar la profundidad de la bomba se tuvo en cuenta el nivel de fluido y la sumergencia.

La sumergencia, es la altura de la columna de fluidos en el anular cuya base es la profundidad de la bomba y el tope es el nivel de fluido dinámico (Escalante, 2016).

Por lo tanto $sumergencia = prof.bomba - NoFo$ donde se asumió una sumergencia de 200 pies y se despejo la profundidad de la bomba; este parámetro fue determinado para los cuatro casos a los cuales se les va a implementar este método de levantamiento.

3.1.2 Presión de la bomba. La bomba soporta una presión ejercida por la columna hidrostática de la sumergencia, por lo tanto $presión\ de\ la\ bomba = 0,433 * GE * h$ donde h es el nivel de sumergencia que para este diseño se asumió de 200 ft y GE es la gravedad específica del fluido tomado de la tabla 6 en el capítulo 2.

3.1.3 Tipo de unidad. Para cada uno de los casos de estudio se plantearon los tres tipos de unidades, teniendo en cuenta que en la unidad convencional puede funcionar con rotación a favor de las manecillas del reloj (CW) o en contra de las manecillas (CCW), con el fin de determinar cuál es la unidad que más huella de carbono aporta. Así mismo el API desarrolló un código de identificación para los distintos tipos de unidades como se observa en la figura 10.

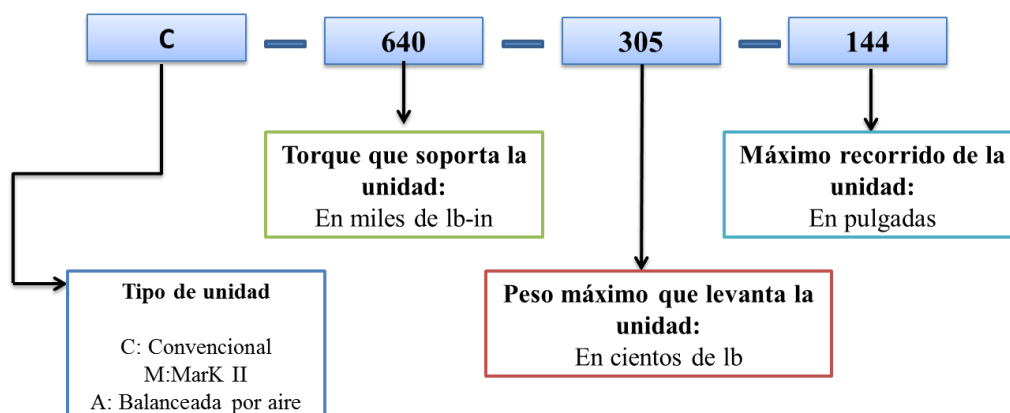


Figura 10. Código de identificación para la unidad convencional. Adaptado de Partidas I.H (2003).

Se escogieron las unidades 640 y 912 del fabricante Lufkin debido a que estos son los más comunes con los que se trabaja en Colombia. Para escoger respectivos torques fue necesario utilizar el software TWM, en la ventana equipo de superficie, en la sección API se escogió el código de identificación que tuvieran respectivos torques y que además en el stroke length hubiese como máximo 3 valores como se observa en la figura 11.

3.1.4 Tasa de stroke y stroke máximo. Cada unidad de bombeo tiene un número de stroke por un determinado tiempo (SPM) o una velocidad de bombeo, estos se determinaron mediante el software Qrod ingresándole parámetros como profundidad de la bomba, longitud del stroke, GE del fluido, tasa de producción, presión de la bomba y caudal; una vez llenado los campos necesarios del software este procedió a calcular automáticamente los SPM.

Por otro lado fue necesario calcular el número máximo de strokes con el fin de que los SPM no fueran mayor a este valor, es decir, el stroke rate max es un valor de referencia de los SPM para las unidades de bombeo, se utilizó la ecuación 8 para determinarlos.

$$stroke\ rate\ maximo = 0,7 \times \sqrt{\frac{60000}{long.stroke}} \quad (8)$$

3.1.5 Potencia. La mayoría de las instalaciones de bombeo mecánico hoy día son movidas por motores eléctricos debido a su bajo costo relativo, facilidad para cambiarlos y para automatizarlos, además los motores son generalmente trifásicos y operan a 60 Hz de frecuencia con velocidades promedios entre 835 y 1200 RPM (Partidas,2003).

Los caballos de fuerza (HP) del motor dependen de la profundidad, el nivel de fluido, velocidad de bombeo y balanceo de la unidad (Patiño y Trujillo, 2016).

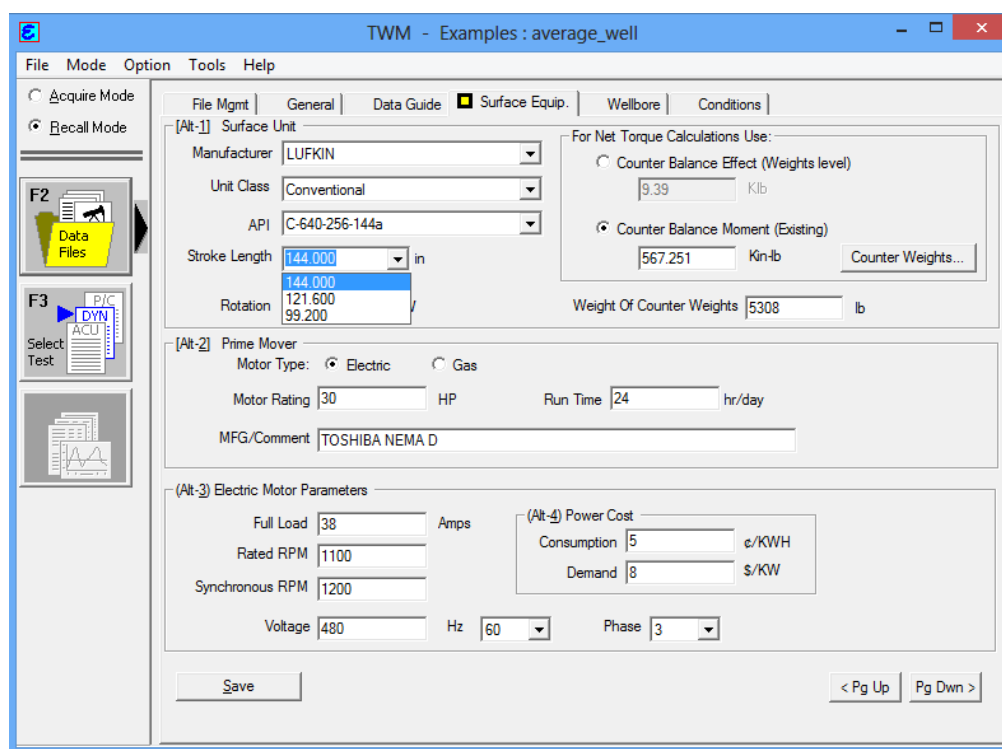


Figura 11. Equipo de superficie bombeo mecánico. Recuperado de software TWM.

La National Electrical Manufacturers Association (NEMA) clasifica los motores según el deslizamiento y las características de torque durante el arranque. NEMA D es el motor de unidad de bombeo más ampliamente reconocido. Su rango de deslizamiento va desde 5% hasta 13% (Patiño y Trujillo, 2016).

EL NEMA D es un motor de alto deslizamiento con características eléctricas y mecánicas diseñadas para obtener un óptimo comportamiento, libre de fallas, en trabajos como en un campo petrolero. Por

consiguiente, este motor tiene un rango alto de variación de velocidad y por tanto, no consume tanta corriente cuando aumente la carga porque puede reducir la velocidad (Partidas,2003).

Por otro lado, para determinar la potencia del motor (HP) para cada uno de los casos de estudios se utilizó el software QRod 3.0 ingresando los parámetros de entrada como se mencionó anteriormente, luego la opción calcular y finalmente en resultados se puede apreciar los HP del motor NEMA D necesaria según los parámetros ingresados para respectivos casos. En la figura 12, se muestra un ejemplo de cómo determinar los HP para el caso de estudio 1, así que en la sección de resultados, ítem “Min NEMA D Motor Size” hay un valor de 7,74 HP; este valor corresponde a la potencia del motor eléctrico necesario para respectivo caso.

Finalmente, como el objetivo de este proyecto es determinar la huella de carbono, los valores de potencia del motor en HP determinados mediante el QRod requieren ser convertidos a kilowatts (Kw) aplicando la ecuación $Kw = \left(\frac{746}{1000}\right) * HP$. Así mismo, como los motores eléctricos no trabajan al 100% de su capacidad, para este proyecto se asumió que el motor trabaja con el 88% de eficiencia, por lo tanto, los Kw que el motor consume se determinaron con la ecuación $Kw\ consumidos = Kw/eficiencia$ y finalmente, se estableció un tiempo de 1 año de trabajo constante del motor equivalente a 8640 horas, así que, la energía consumida por el sistema de levantamiento en Kwh/año es $\frac{Kwh}{año} = kw\ consumidos \times tiempo(h)$.

Ver tabla 10 donde se muestra un ejemplo del caso de estudio 1 de la energía consumida en superficie al año por la una unidad 640. Para ver el diseño completo de las unidades 640 y 912 ver apéndices A-4 y A-5 y así mismo el diagrama de flujo mostrado en la figura 13

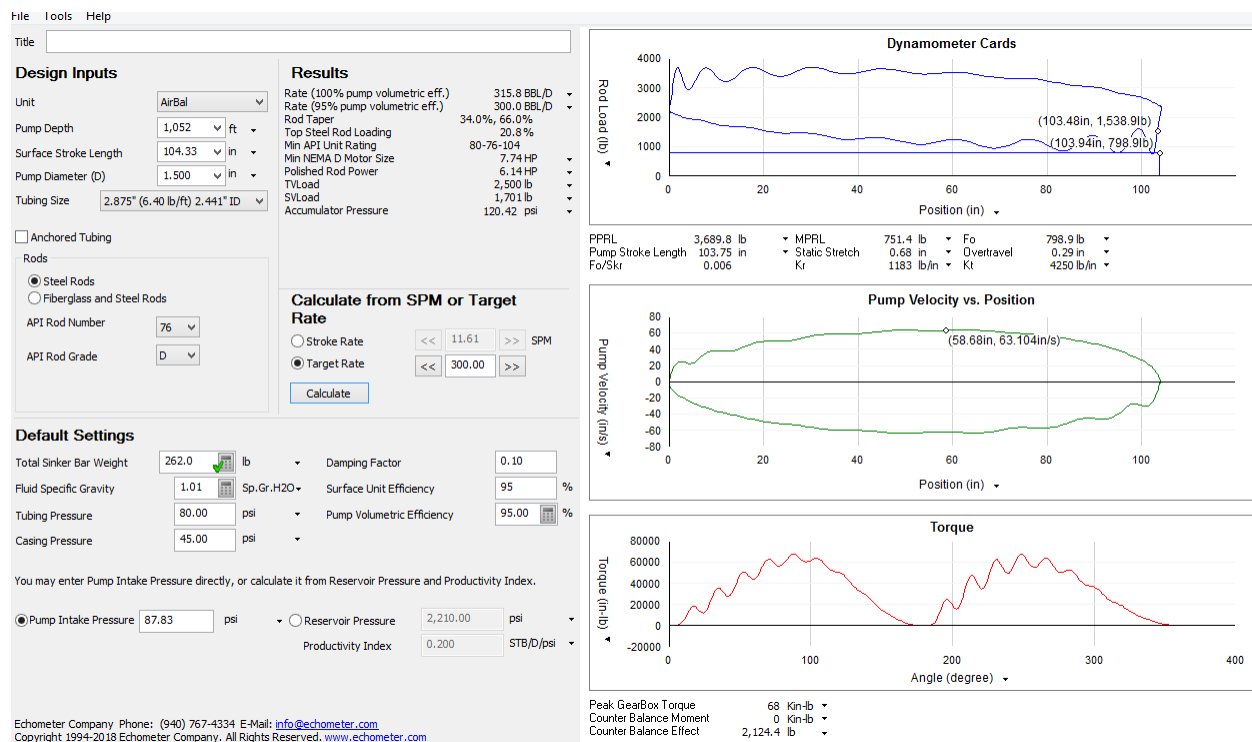


Figura 12. Potencia del motor para caso de estudio 1. Recuperado de QRod 3.0.

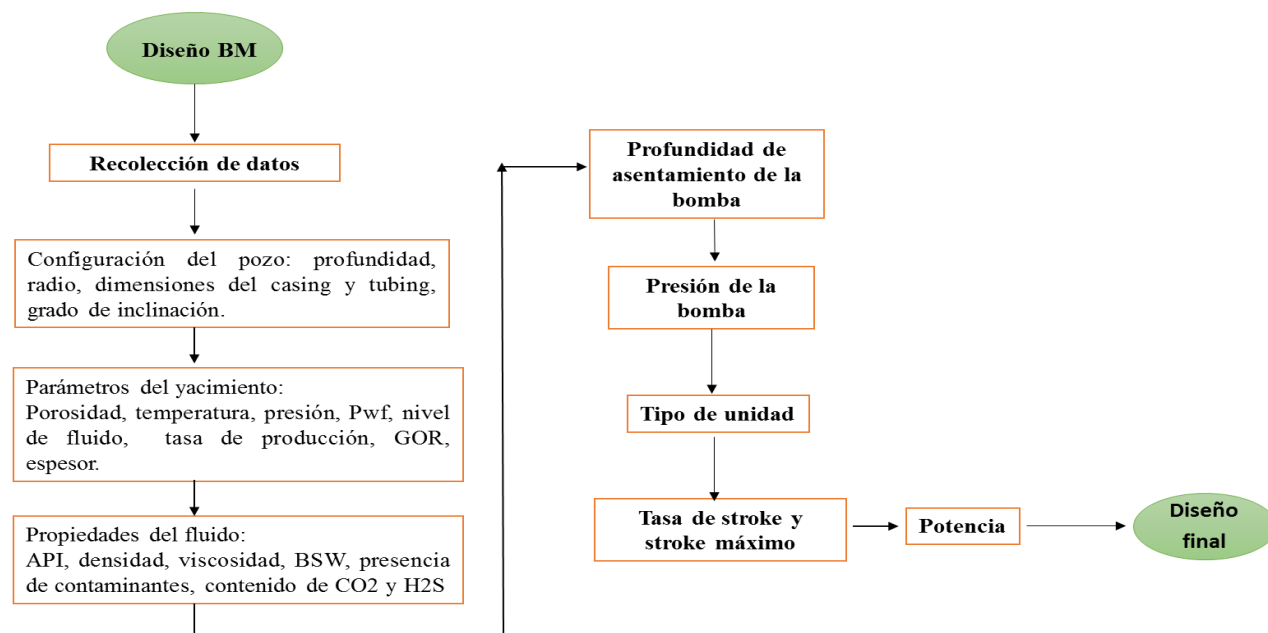


Figura 13. Diagrama de flujo para el diseño del sistema Bombeo mecánico.

Tabla 10.

Energía consumida por el sistema BM 640 en superficie

							Energía consumida por la unidad SLA Kwh/año	
Unit class	API	Potencia HP	Potencia KW necesaria	Eficiencia del motor	Potencia KW del motor	Tiempo (h)		
caso 1	Balanceada por aire	A-640-305-144	7.74	5.77	0.88	6.56	8640	5.67E+04
			7.67	5.72	0.88	6.50	8640	5.62E+04
			7.62	5.68	0.88	6.46	8640	5.58E+04
	CW convencional	C-640-256-144a	8.94	6.67	0.88	7.58	8640	6.55E+04
			8.92	6.65	0.88	7.56	8640	6.53E+04
			9.00	6.71	0.88	7.63	8640	6.59E+04
	CCW convencional	C-640-256-144a	8.64	6.45	0.88	7.32	8640	6.33E+04
			8.59	6.41	0.88	7.28	8640	6.29E+04
			8.64	6.45	0.88	7.32	8640	6.33E+04
	Mark II	M-640-253-144	7.74	5.77	0.88	6.56	8640	5.67E+04
			8.14	6.07	0.88	6.90	8640	5.96E+04
			8.63	6.44	0.88	7.32	8640	6.32E+04

3.2 Bombeo electrosumergible

Para realizar el diseño del sistema BES es necesario contar con información confiable y acertada del pozo o caso de estudio en particular, para este proyecto se requirió calcular la energía requerida en superficie para levantar el fluido a un caudal de trescientos barriles por día y finalmente calcular la huella de carbono.

Baker Hughes Centrilift propuso la metodología de los nueve pasos para el diseño del BES, por lo cual este sistema se diseña teniendo en cuenta respectivos pasos mencionados a continuación.

El primer paso de este diseño solicita una recolección y análisis de los datos del pozo, el segundo es determinar su capacidad de producción, estos primeros cálculos se realizaron en el

capítulo 2. Así mismo para continuar con el diseño, el tercer paso es calcular el volumen de gas, en este proyecto se plantea una profundidad de sumergencia de 1000 pies con el fin de asumir que a esa profundidad existe la mínima cantidad de gas de tal forma que se evite los bloqueos y no se afecte la eficiencia del equipo y por consiguiente se realiza el cálculo correspondiente para determinar la fracción de gas en el entrada de la bomba con el fin de verificar dicho parámetro.

Continuando con la metodología de diseño, el cuarto paso es determinar la carga dinámica total, quinto seleccionar el tipo de bomba, sexto tamaño óptimo de los componentes, séptimo escoger el cable eléctrico que se adapte a las condiciones, octavo elegir accesorios y equipo opcional y finalmente el noveno paso es seleccionar la variable de velocidad del sistema de bombeo. Los nueve pasos serán aplicados en el diseño con el fin de determinar la potencia requerida por la bomba el cual es suministrado por un motor eléctrico que se encuentra ubicado en el fondo del pozo y así mismo llegar a determinar la energía consumida en superficie, el cual este dato es aportado por la potencia requerida por el transformador y así proceder a realizar el cálculo de la huella de carbono.

3.2.1 Nivel de profundidad de la bomba. Se asume un nivel de sumergencia de 1000 pies con el fin de que a esa profundidad exista la mínima cantidad de gas libre, igualmente para confirmar esta teoría se calculó la fracción de gas a la entrada de la bomba y se confirmó que la fracción es menor a 7% la cual no afecta la eficiencia de este equipo; por lo tanto el nivel de profundidad de la bomba es calculado como *Nivel de prof de la bomba = NoFo + sumergencia*.

3.2.2 Presión de entrada (intake) a la bomba (PIP). Es la presión que genera el fluido aportado por el yacimiento en la entrada de la bomba.

$$PIP = P_{wf} - ((PMP - \text{Nivel de prof. de la bomba}) * GEm) / 2.31 \quad (9)$$

Donde 2.31 psi/ft es una constante y PMP es el punto medio de perforados.

3.2.3 Carga dinámica total (TDH). La carga dinámica total o cabeza requerida corresponde a la cabeza que la bomba debe vencer para que el fluido llegue a superficie (Rodríguez y Robles, 2010). La TDH se calcula sumando el nivel de fluido con las pérdidas por fricción en la tubería y en las líneas de flujo, algebraicamente así, $TDH = H_d + F_t + P_d$ donde H_d es la distancia en pies entre el nivel de fluido en producción y la superficie; F_t hace referencia a las pérdidas de fricción en el Tubing y P_d a la presión de descarga en cabeza. En la figura 14 se muestra cada uno de los parámetros que compone la TDH.

3.2.3.1 Nivel de fluido (H_d). Es la distancia en pies entre el nivel de fluido dinámico y la superficie. Para calcularla se sigue la ecuación $H_d = Nb - \left(\frac{PIP}{0.433 * GEm}\right)$ donde Nb es el nivel de profundidad de la bomba y PIP es la presión de entrada a la bomba.

3.2.3.2 Pérdidas por fricción en el tubing (H_f). Para hallar las pérdidas de fricción en tubería se tiene en cuenta el factor $f/1000'$, este factor hace referencia a la pérdida de carga por cada 1000 pies de tubería y se obtuvo de la correlación de Hazen y Williams (ecuación 10)

$$\left(\frac{f}{1000'}\right) = 2.083 * \left(\frac{100}{c}\right)^{1.85} * \left(\frac{Q^{1.85}}{ID^{4.8655}}\right) \quad (10)$$

Donde C es una constante y es igual a 120. Finalmente para terminar de hallar las pérdidas de fricción en el tubing se utilizó la ecuación 11.

$$HF = \frac{\text{Profundidad de la bomba} * \left(\frac{f}{1000'}\right)}{1000} \quad (11)$$

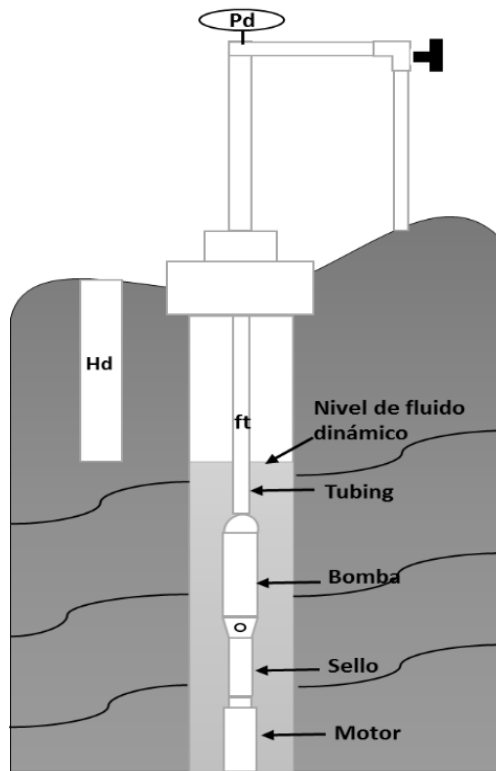


Figura 14. Carga dinámica total (TDH). Adaptado de: Baker Hughes Centrilift

3.2.3.3 Pérdidas de fricción en la línea de flujo (Pd). Se asumió un valor de pérdidas de fricción en línea de flujo para todos los casos de estudio de 200 psi, sin embargo este valor debe ser convertido a pies (ft) utilizando la ecuación 12

$$Pd = \frac{psi}{0.433 \frac{psi}{ft} * GEm} \quad (12)$$

3.2.4 Tipo de bomba. Las bombas electrosumergibles son centrifugas multi-etapas. Cada etapa consiste en un impulsor rotativo y un difusor estacionario (Rodríguez y Robles, 2010).

El número de etapas determina la carga total generada y la potencia requerida, así mismo provee una altura de levantamiento de fluido. Las bombas se fabrican de diferentes materiales de acuerdo a los requerimientos del pozo y del operador (Ramírez M, 2004).

Para determinar la bomba adecuada, en el catálogo de productos Borets International con base en la tasa de producción deseada que para este proyecto es de 300 Bls/d se escogió las bombas 338-400 y 400-350 de 60 Hz para cada uno de los casos de estudio. Se seleccionó estas dos series de bombas con el fin de realizar una comparación de cuál bomba consume más potencia (HP).

3.2.4.1 Levantamiento por etapa de la bomba. Después de seleccionar la bomba, se procede a determinar el número de etapas requeridas para producir la cantidad de carga dinámica total previamente calculada. Así mismo, en el catálogo de productos Borets International se busca la referencia de la bomba y se lee el valor correspondiente a una tasa de 300 Bls/d para encontrar la capacidad de elevación de la bomba por etapa o head (ft); sin embargo estas graficas son realizadas teniendo en cuenta que la gravedad especifica del agua es 1.0 por lo tanto es necesario realizar la corrección para una mezcla agua-petróleo. Entonces utilizando la ecuación $Head (ft) = Head/GEm$ se determina el levantamiento por etapa corregido. En la figura 14 se muestra un ejemplo de cómo se determina la cabeza de levantamiento.

3.2.4.2 Numero de etapas. Para determinar el número de etapas requeridas se divide la carga dinámica total o cabeza requerida en el levantamiento por etapa corregido.

$N^{\circ} \text{ de etapas teorico} = \frac{TDH}{\text{levantamiento por etapa (ft)}}$, pero este número de etapas es teórico, por lo cual es necesario un factor de seguridad del 20% para garantizar que al poner a trabajar la bomba no haya una limitante por falta de etapas, por consiguiente $N^{\circ} \text{ etapas} = N^{\circ} \text{ etapas teorico} * 1.2$. Así mismo, es recomendable aproximar al entero superior.

3.2.4.3 Potencia de la bomba. La potencia de la bomba se determina mediante la misma gráfica utilizada para determinar el levantamiento por etapa del catálogo de productos Borets International (Apéndice B), por ejemplo en la figura 15 entrando por la tasa deseada, para este caso de 300 Bls/d, se corta con la curva de potencia y se lee en el respectivo eje los caballos de fuerza de la bomba. La potencia hallada mediante la gráfica es un valor teórico, por consiguiente para determinar la potencia real de la bomba a ese HP teórico se le suma el 50% para garantizar que al cambiar la frecuencia de operación de la bomba no se presente una falla en esta; por lo tanto la potencia de la bomba es $HP = N^{\circ} \text{ etapas} * HP \text{ bomba} * GEm * 1.5$.

3.2.4.4 Eficiencia de la bomba. Las bombas trabajan con un porcentaje de eficiencia, para determinar este valor se lee en la figura 15, curva de eficiencia, el valor a la tasa de 300 Bls/d, finalmente se lee en el eje derecho de color verde la eficiencia de la bomba, esta lectura es equivalente a la eficiencia de la bomba si el fluido levantado es agua, por tal motivo se procede a corregir por viscosidad aplicando la norma American National Standard for Effects of Liquid Viscosity on Rotodynamic (Centrifugal and Vertical) Pump Performance ANSI/HI 9.6.7-2010

(ver apéndice D), donde define en primer lugar un parámetro que se denomina parámetro B producto de la ecuación 13.

$$B = \frac{26.6(Vvis)^{0.50}*(Hbep-w)^{0.0625}}{(Qbep-w)^{0.375}*N^{0.25}} \quad (13)$$

Dónde: Viscosidad (Vvis) esta cSt, la cabeza de levantamiento (Hbep-w) está en ft, caudal (Qbep-w) gpm y velocidad de la bomba en RPM.

Una vez hallado B se pueden presentar tres casos, el primero que B sea menor o igual a 1, en tal caso el factor de corrección de la eficiencia (C η) sería igual 1, el segundo caso es cuando B es mayor a 40, para tal caso la metodología no es suficiente y no se garantizan que los resultados sean coherentes con la realidad. La tercera situación es cuando B se encuentre entre un valor de 1 a 40, para este proyecto todos los pozos tipos entraron en este rango, ver tabla 11 donde se evidencia los valores de B, para este escenario se plantea la ecuación 14.

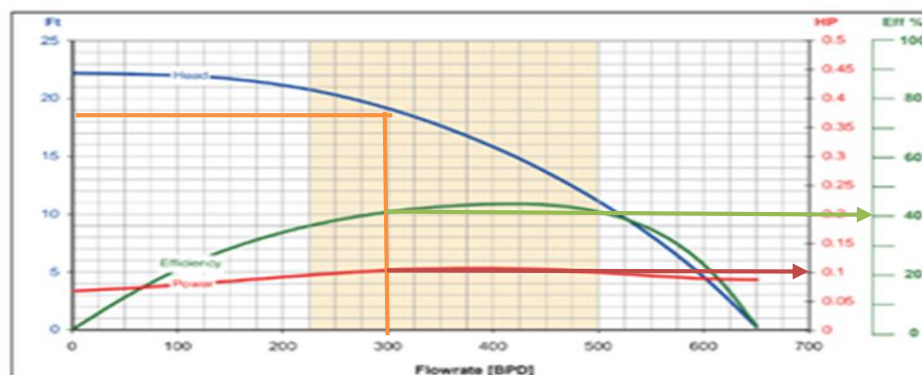
$$C\eta = B^{-0.0547*B^{0.69}} \quad (14)$$

Luego de hallado el factor de corrección se multiplica por el valor leído en gráfica y este finalmente sería el valor de eficiencia de la bomba corregida por efecto de la viscosidad del fluido.

La potencia de la bomba (HP) requiere ser convertida a Kw para proceder a determinar la huella de carbono, por consiguiente la energía requerida por la bomba es $Kw = Kw/\%eficiencia$

Pump 338-400

60 Hz Data



Technical Data - 60 Hz

Nominal pump housing diameter (in).	3.38	Shaft brake-power limit (HP)	Standard	88
Shaft diameter (in).	0.625		High Strength	169
Shaft cross-sectional área (in ²)	0.307	Housing pressure limit (psi)	Standard	N/A
Min. Casing size (in).	4.5		Buttres	6000

Figura 15. Capacidad de elevación (ft). Recuperado de catálogo de productos Borets International 2011.

Tabla 11.

Corrección de la eficiencia de la bomba por efecto de la viscosidad

	Parámetro B	Factor de corrección de eficiencia por viscosidad	Modelo de la bomba	Eficiencia de la bomba leído en gráfica	Eficiencia de la bomba corregida
caso 1	16,87	0,34	338-400	0,4	0,14
			400-350	0,4	0,14
caso 2	16,58	0,35	338-400	0,4	0,14
			400-350	0,4	0,14
caso 3	11,39	0,49	338-400	0,4	0,20
			400-350	0,4	0,20
caso 4	7,11	0,66	338-400	0,4	0,26
			400-350	0,4	0,26

3.2.5 Motor. El motor eléctrico utilizado en el sistema BES es un motor de inducción, con estator bobinado, bipolar, trifásico, rotor jaula de ardilla, el cual opera a una velocidad de 3600 rpm, a una frecuencia nominal de 60 Hz (Constante Barragán, L.A, 2002).

Los motores de inducción son dispositivos que transforman energía eléctrica en energía mecánica. Es también considerado como un transformador giratorio, porque induce voltajes y corrientes en el rotor. Desde el punto de vista mecánico, el motor de inducción, se compone de dos grandes conjuntos de piezas el cual son el estator que abarca todo el grupo de partes inmóviles y el rotor que abarca el grupo de partes giratorias (Ramírez M, 2004).

Con base en la potencia de las bombas seleccionadas, se determinó la potencia requerida por el motor debido a que el diseño implica un sobredimensionamiento de este entre un 30%-50%, por consiguiente se realizó una revisión en el catálogo de productos Borets International con el fin de encontrar el motor eléctrico adecuado para cada caso de estudio, encontrando que el motor 540 IL 180 de 60 Hz, es el motor que cumple con el valor de potencia para todos los casos de estudio. En la tabla 12 se muestra los resultados de la potencia requerida por el motor, así como las especificaciones de este.

3.2.6 Cable eléctrico. El cable trifásico, transmite la energía eléctrica desde la fuente de poder en superficie hasta el motor en el pozo. Los conductores son de tipo sólido o trenzado, pueden ser de diferente diámetro de acuerdo a la aplicación requerida. Su configuración puede ser plana o redonda, el cable redondo ayuda a eliminar el desbalance entre las fases. Su uso depende de factores mecánicos y de diámetros (Ramírez, 2004).

La American Wire Gauge (AWG) para aplicaciones ESP, ha estandarizado cuatro tamaños de conductores los cuales son # 1, # 2, # 4 y # 6.

Debido a la resistencia del conductor, habrá una caída de voltaje desde el suministro de la superficie a los terminales del motor, por consiguiente al seleccionar el tamaño del cable se recomienda que este tenga unas pérdidas de voltaje menor a 30 volts/1000 ft.

En este diseño se seleccionó el cable #6 debido a que cumple con el rango de pérdidas de voltaje y además es el más económico. De igual manera, para determinar las pérdidas de voltaje se utiliza la gráfica mostrada en la figura 16; el amperaje del motor seleccionado y la temperatura de fondo de pozo permiten leer el valor de pérdidas.

Tabla 12.
Tipo de motor y especificaciones de potencia para BES

Casos	velocidad de la bomba (Hz)	Modelos de bomba	Potencia requerida por motor (kW)	Motor	HP	KW	Volts	Amps
caso 1	60.00	338-400	93.02	540 IL 180	130	96.9	1125	67
	60.00	400-350	93.39	540 IL 180	130	96.9	1125	67
caso 2	60.00	338-400	47.40	540 IL 180	70	52.2	755	60
	60.00	400-350	47.27	540 IL 180	70	52.2	755	60
caso 3	60.00	338-400	54.95	540 IL 180	80	59.7	865	60
	60.00	400-350	54.38	540 IL 180	80	59.7	865	60
caso 4	60.00	338-400	38.18	540 IL 180	60	44.7	870	45
	60.00	400-350	38.15	540 IL 180	60	44.7	870	45

El valor leído de la gráfica es para una temperatura del conductor de 77 ° F (25 ° C) y una longitud de 1,000 pies por lo tanto, es necesario determinar un factor de temperatura para realizar la corrección del valor a la temperatura de cada uno de los casos de estudio, para esto se utilizó la

ecuación $TCF\ cable = 1 + 0.00214 (T_{conductor} - 77)$ donde $T_{conductor}$ es la temperatura del pozo en la profundidad de ajuste de la bomba y TCF cable es el factor de corrección de temperatura para el cable.

De igual manera, se debe determinar las pérdidas de voltaje hasta la profundidad de asentamiento de la bomba, para los casos de estudio se recomienda adicionar entre 100 a 200 ft de cable en superficie, para este diseño se adicionan 100 ft, por consiguiente la ecuación 15 es utilizada para calcular las pérdidas de voltaje a la profundidad de la bomba.

$$\frac{Perdidas\ de\ voltaje}{prof.bomba} = \frac{(valor\ grafica * TCF\ cable) * (prof.bomba + 100)}{1000} \quad (15)$$

3.2.7 Voltaje en superficie. El voltaje en superficie (SV) es la suma del voltaje del motor y las pérdidas de voltaje del cable, por lo tanto $SV = Voltaje\ motor + \frac{perdidas\ de\ voltaje}{prof.bomba}$

Así mismo para seleccionar el transformador se requiere conocer los KVA por consiguiente

$$KVA = \frac{SV \times Amperios\ Motor \times 1.73}{1000}$$

pero este valor requiere ser convertido a Kilowatts (Kw) con

el fin de realizar los cálculos correspondientes para evaluar la huella de carbono, así que los

$Kw = KVA * FP$. Donde FP es un factor de potencia que para este diseño se escogió un valor de 0.9.

En la tabla 13 se muestran los resultados de la conversión de KVA a Kw para los cuatro casos de estudio; de igual forma en la tabla 14 se presenta los resultados de la energía consumida en superficie al año por el sistema; sin embargo en el apéndice A-6 se puede observar el diseño completo de este sistema de levantamiento artificial y así mismo en la figura 17 se muestra un diagrama de flujo utilizado para el diseño del sistema.

Tabla 13.
 Conversión de los KVA a Kw

Cable #6	KVA	Factor de potencia	transformador (KW)
Caso 1	141.24	0.90	127.12
caso 2	85.58	0.90	77.02
caso 3	99.44	0.90	89.50
caso 4	74.21	0.90	66.79

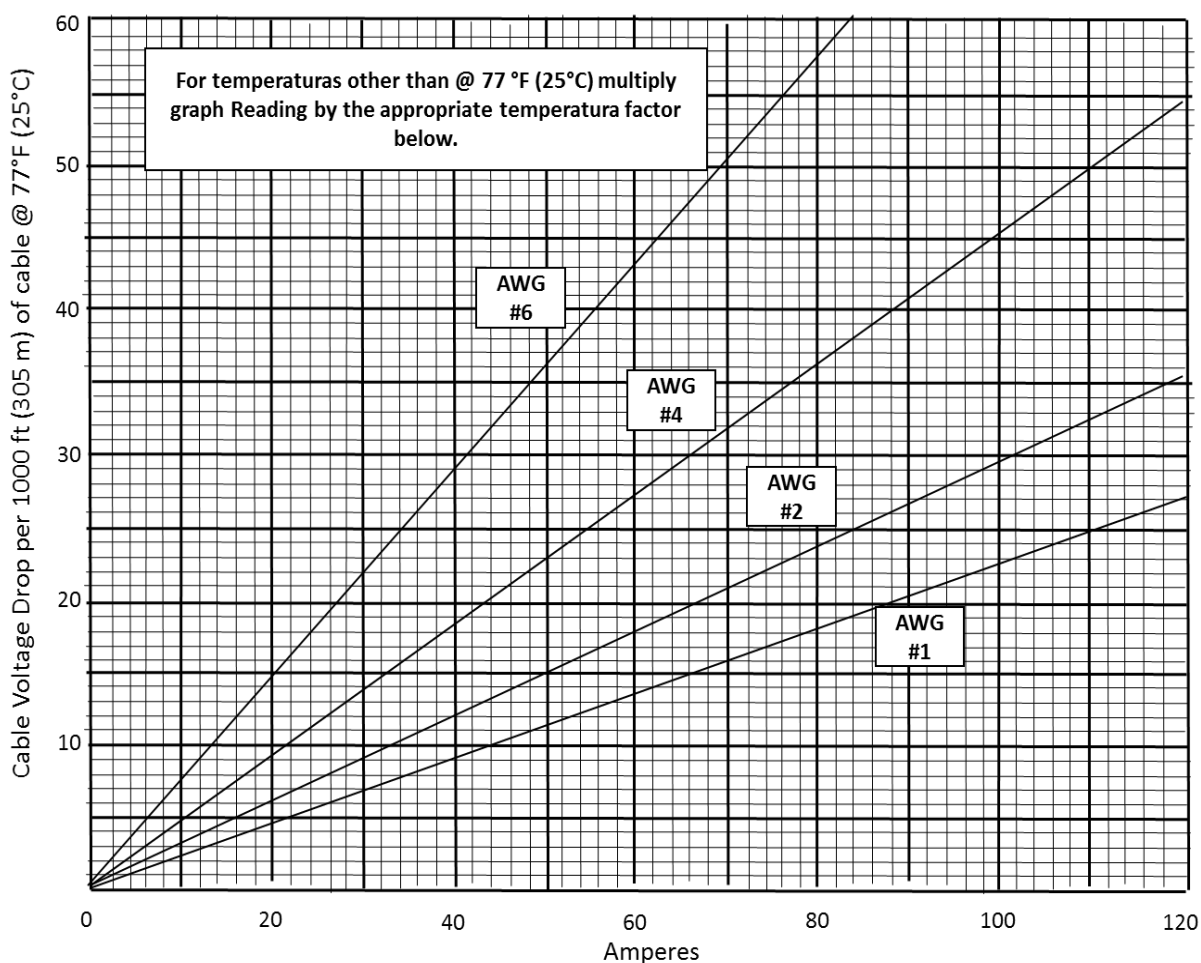


Figura 16. Grafica pérdidas de voltaje para cables eléctricos. Recuperado de http://petrowiki.org/ESP_power_cable.

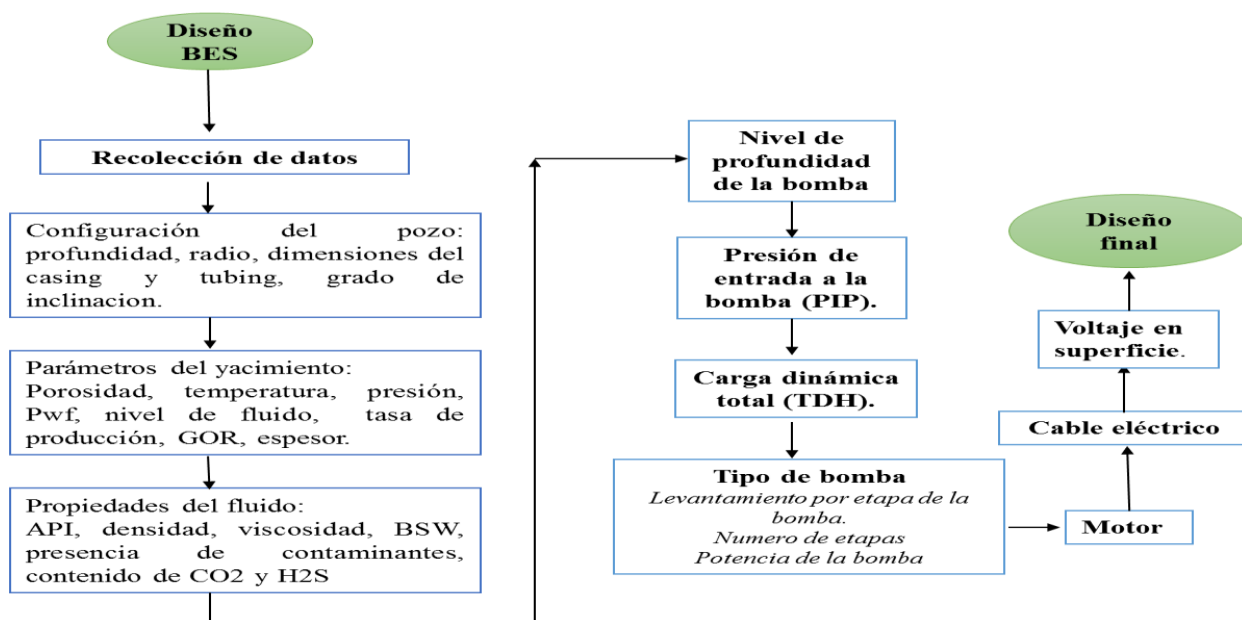


Figura 17. Diagrama de flujo para el diseño del sistema BES.

Tabla 14.

Energía consumida por el sistema BES en superficie

60 Hz	Modelo de la bomba	Potencia (KW)	Eficiencia de la bomba	Eficiencia de la bomba corregida	Potencia de la bomba (Kw)	Motor eléctrico	Transformador (Kw)	Tiempo (h)	Energía consumida por la unidad SLA (Kwh/año)
caso 1	338-400	9.66	0.40	0.14	71.56	540 IL 180	127.12	8640	1098290.68
	400-350	9.70	0.40	0.14	71.84	540 IL 180	127.12	8640	1098290.68
caso 2	338-400	5.02	0.40	0.14	36.46	540 IL 180	77.02	8640	665491.98
	400-350	5.01	0.40	0.14	36.36	540 IL 180	77.02	8640	665491.98
caso 3	338-400	8.29	0.40	0.20	42.27	540 IL 180	89.50	8640	773256.55
	400-350	8.20	0.40	0.20	41.83	540 IL 180	89.50	8640	773256.55
caso 4	338-400	7.75	0.40	0.26	29.37	540 IL 180	66.79	8640	577066.97
	400-350	7.75	0.40	0.26	29.34	540 IL 180	66.79	8640	577066.97

3.3 Bombeo de cavidades progresivas

El diseño de este sistema se realiza teniendo conocimiento de la información de los pozos o casos de estudio, tales como: estado mecánico, propiedades del fluido e información de producción. La finalidad del diseño es determinar la potencia consumida por la bomba y así mismo la energía que consume el motor en superficie para mediante estos datos evaluar la huella de carbono que emite este sistema de levantamiento.

3.3.1 Profundidad de la bomba. Para este sistema es común una sumergencia de la bomba de 500 pies, por lo tanto la profundidad de asentamiento de la bomba es hallada con la ecuación 16.

$$Prof. de la bomba = NoFo + 500 \text{ pies} \quad (16)$$

3.3.2 Presión de entrada a la bomba (PIP). Es la presión que genera el fluido aportado por el yacimiento en la entrada de la bomba, se determinar aplicando la ecuación 17.

$$PIP = Pwf - (0.433 * GEm * (PMP - prof. de la bomba)) \quad (17)$$

3.3.3 Carga dinámica total (TDH). Igual que en el diseño del sistema BES la carga dinámica total es establecido por la suma del nivel de fluido, las pérdidas de fricción en el tubing y en la línea de flujo, es decir, $TDH = H_d + F_t + P_d$.

3.3.4 Selección del elastómero. El Elastómero constituye el elemento más “delicado” de la Bomba de Cavidades Progresivas y de su adecuada selección depende en una gran medida el éxito o fracaso de esta aplicación. Deben presentar resistencia química para manejar los fluidos

producidos y excelentes propiedades mecánicas para resistir los esfuerzos y la abrasión (Chacín, 2013).

Para seleccionar el elastómero se tiene en cuenta la temperatura en la profundidad de asentamiento de la bomba y el API del crudo (ver figura 18), por consiguiente para hallar la temperatura se determina el gradiente geotérmico de cada uno de los casos de estudio y además se le suma entre 30 a 60° F de temperatura debido a que es un factor de tolerancia para prevenir efectos de calentamiento de la bomba por la fricción. Por lo tanto, la temperatura en la profundidad de asentamiento de la bomba se puede determinar con la ecuación 18.

$$^{\circ}T = \left(\left(\frac{\text{gradiente geotermico}}{1000} \right) * \text{prof. de la bomba} + ^{\circ}T \text{ superficie} \right) + 60^{\circ}F \quad (18)$$

En el apéndice A-7 se evidencia el valor de temperatura y así mismo el tipo de elastómero seleccionado para cada caso de estudio.

3.3.5 Tipo de bomba. La Bomba de Cavidades Progresivas (BCP) está compuesta por el Rotor y el Estator. El Rotor es accionado desde la superficie por un sistema impulsor que transmite el movimiento rotativo a la sarta de varillas la cual, a su vez, se encuentra conectada al Rotor. El Estator es el componente estático de la bomba y contiene un polímero de alto peso molecular con la capacidad de deformación y recuperación elástica llamado Elastómero (Chacín, 2013).

La bomba se selecciona de tal forma que tenga la capacidad de producir la tasa requerida a las condiciones de operación, para esto se establece un caudal de diseño (bls/día) para cada uno de los casos el cual, $Q_{\text{diseño}} = \frac{100 \times Q_{\text{requerido}}}{n}$ donde $Q_{\text{requerido}}$ es la tasa requerida (bls/día) y n es la eficiencia volumétrica de la bomba (%).

Para el caso de bombas (BCP) se considera un rendimiento del 60 a 70%, por consiguiente considerando un eficiencia del 70% y con base al Qdiseño el cual es 429bls/día para todos los casos de estudio, se selecciona según el catálogo de Netzsch el modelo de bomba NTZ 400*065ST33 el cual debe trabajar a una velocidad de 206 rpm (ver figura 19).

3.3.5.1 Potencia requerida por la bomba. La potencia total requerida para accionar la bomba es determinada por una potencia hidráulica (HHP), la cual es determinada mediante la ecuación 19.

$$HHP = Q \left(\frac{BBl}{dia} \right) * P(psi) * 0,000017024 \quad (19)$$

Donde P es la presión ejercida por la cabeza dinámica total y Q es la tasa requerida.

Por tanto, la potencia total requerida para accionar la bomba es hallada con la ecuación 20.

$$Potencia consumida(HP) = \frac{HHP}{n} \quad (20)$$

Donde n es la eficiencia volumétrica de la bomba.

3.3.6 Requerimiento de torque. El torque se define como la energía requerida para girar el rotor y mover el fluido a la presión necesaria. El torque de la bomba está compuesta por una parte hidráulica, otra de fricción y de resistencia. Por definición, el torque de fricción es la energía requerida para vencer el ajuste de interferencia entre el estator y rotor, este torque depende del ajuste de interferencia del revestimiento del rotor, del elastómero del estator, de las propiedades lubricantes del fluido y de la longitud de la bomba, además tiene un valor muy pequeño, alrededor de 80-90 N-m, valor que se determina en el ensayo de la bomba. Por otro lado, el torque hidráulico

tiene que ver con los HP hidráulicos que dependen del caudal a extraer y de las presiones requeridas; el torque hidráulico es proporcional al levantamiento y al desplazamiento de la bomba (Matos Gutiérrez, 2009).

Características	tipo de elastómero				
	Buna		Alto de nitrilo	Hidrogenado	Viton
	suave	medio			
Elastómeros Weatherford	NBRM 55	NBRM 70	NBRA 70	HNBR (P)	FKM
	NBRM 64				
	590-55	590	68A-1	45C (P)	
	366/55	366	356		HTR
	G62A	N080	G60		
Propiedades mecánicas	Excelente		Bueno	Bueno	Pobre
Resistencia abrasión	Muy buena		Bueno	Bueno	Pobre
Resistencia aromáticos	Bueno		Muy bueno	Bueno	Excelente
Resistencia H ₂ S	Bueno		Muy bueno	Excelente	Excelente
Resistencia agua	Bueno		Bueno	Excelente	Excelente
Limite de temperatura	95 °C (203 °F)		105 °C (221 °F)	135°C (221 °F)	150 °C(302 °F)

Figura 18. Selección del elastómero. Adaptado de Catalogo Weatherford.

Al producirse el movimiento de rotación de la sarta de varilla dentro de la tubería de producción, se produce una fuerza de resistencia generada por el fluido sobre las varillas. Esta fuerza de resistencia genera un torque adicional que se conoce como torque de resistencia (Monsalve Duarte, 2012).

Por consiguiente, el torque total es la suma del torque hidráulico ($T_{hidraulico}$), el torque de fricción ($T_{fricción}$), y el torque de resistencia, como sigue $T_{total} = T_{hidraulico} + T_{fricción} + T_{resistencia}$.



Figura 19. Modelo de bomba PCP caso de estudio 1. Adaptada de Catalogo de Netzsch.

3.3.6.1. Torque hidráulico. El torque hidráulico se calcula utilizando la ecuación $T_{hidraulico} = c \times v \times TDH(psi)$ donde C es una constante con valor de 0.0897 y v es el desplazamiento de la bomba (Bls/dia/rpm) que se determina $v = \frac{Q_{diseño}}{velocidad\ de\ la\ bomba\ N\ (rpm)}$

3.3.6.2 Torque de resistencia. El torque de resistencia se determina mediante la ecuación 21.

$$T_{resistencia} = \frac{C \times D_r^3 \times L \times \mu \times N}{D_t - D_r} \quad (21)$$

Donde D_r : Diámetro externo de las varillas (milímetros o pulgadas), L : longitud de la sarta de varillas (metros o pies), μ : Viscosidad del Fluido (centipoise), N : Velocidad de rotación del sistema (RPM), D_t : Diámetros interno de la tubería de producción (milímetros o pulgadas)

3.3.7 Carga axial. La carga axial que soportan las varillas de bombeo depende de parámetros como el peso de las varillas (F_1) y Efecto de la presión sobre la impulsión de la bomba (F_2).

Las varillas de bombeo API son varillas de acero enroscadas unas con otras por medio de coples, formando la mencionada sarta, que va desde la bomba hasta la superficie. Los diámetros máximos utilizados están limitados por el diámetro interior de los tubing, utilizándose por ejemplo de 7/8" o 1" (coples slip hole) en tubings de 2 7/8". Su longitud puede ser de 25' o 30' (Matos Gutiérrez, 2009).

Para los casos de estudio se seleccionó varillas de 1" grado K para el caso 1 y para el resto de casos varillas 1" grado C.

El peso de las varillas es $F_1 = longitud \times peso\ nominal\ de\ la\ varilla$ el cual para varillas de 1" el peso es de 2.926 lb/ft.

El efecto de la presión sobre la impulsión de la bomba es $F_2 = P_{total} \times \text{área efectiva}$ donde P_{total} es la presión ejercida por la cabeza dinámica total y el área efectiva es calculada mediante la siguiente ecuación 22

$$A_{efectiva} = \frac{\pi}{4} \times (D_{rotor}^2 - 645.16 d_{rod}^2) \quad (22)$$

Donde D_{rotor} es Diámetro mayor del rotor (mm) y d_{rod} es Diámetro de la varilla de bombeo (pulg).

De acuerdo al modelo de la bomba seleccionada para todos los casos de estudio el diámetro mayor del rotor es 56.0 mm.

3.3.8 Selección del cabezal. Los cabezales son requeridos en sistemas convencionales de bombeo PCP para transferir potencia desde el motor primario a la bomba, la cual es manejada por la sarta de varillas de bombeo. Además deben cumplir con otras funciones, tales como proveer acción de sellado entre la boca de pozo y el vástago, soportar la carga axial determinada por la acción de bombeo y proveer un medio adecuado de controlar el giro inverso de la sarta (backspin) (Neztch, 2004).

La selección del cabezal se realiza teniendo en cuenta la carga axial y la potencia consumida por la bomba, según el catálogo de Netzsch (Apéndice C) se escogen los cabezales mostrados en la tabla 15.

Tabla 15.
Selección del cabezal para casos de estudio

		Potencia bomba	
	Carga Axial (lb)	(HP)	Modelo cabezal
caso 1	5678.15	4.14	NDH 030 DH9
caso 2	4112.53	2.78	NDH 010 DH5
caso 3	6062.71	4.09	NDH 030 DH9
caso 4	7926.48	5.18	NDH 020 DH20

3.3.9 Potencia consumida por el motor. Los sistemas PCP pueden ser adaptados a motores eléctricos como a motores de combustión interna. Siendo el primero de ellos el más utilizado por su mayor eficiencia de operación y capacidad de automatización. La función principal de la fuente de

energía primaria es proveer la potencia requerida por el sistema para poder operar. Esta potencia es función directa del torque total del mismo (Monsalve Duarte, 2012).

La potencia requerida por el motor (P_{req}) se calcula como sigue con la ecuación 23.

$$P_{req} = \frac{C \times T_{sarta} \times N}{\mu_{transmisión}} \quad (23)$$

Donde T_{sarta} es el torque total de la sarta, N es la velocidad de rotación del sistema (rpm), $\mu_{transmisión}$ es la eficiencia de transmisión del sistema (%) y C es la constante con un valor de $1,917 \times 10^{-4}$.

La eficiencia de transmisión del sistema establecido para los casos de estudio es de 95%, en la tabla 16 se muestra los resultados de la energía consumida en superficie al año; sin embargo el diseño completo de este sistema de levantamiento se observa en el apéndice A-7 y ver el diagrama de flujo en la figura 20.

Tabla 16.
Energía consumida por el sistema PCP en superficie.

	Eficiencia de transmisión	Potencia requerida por motor (HP)	Potencia requerida por motor (kW)	Tiempo (h)	Energía consumida por la unidad SLA Kwh/año
caso 1	0.95	16.53	12.33	8640	106571.43
caso 2	0.95	12.20	9.10	8640	78633.95
caso 3	0.95	11.33	8.45	8640	73044.00
caso 4	0.95	10.04	7.49	8640	64742.90

3.4 Resumen de Resultados.

La tabla 17 presenta los resultados de potencia requerida para el funcionamiento de los sistemas en unidades Kw debido a que este valor se requiere para proceder con el cálculo de la huella de carbono emitida por los sistemas y así mismo determinar el dinero invertido para pagar dicha energía.

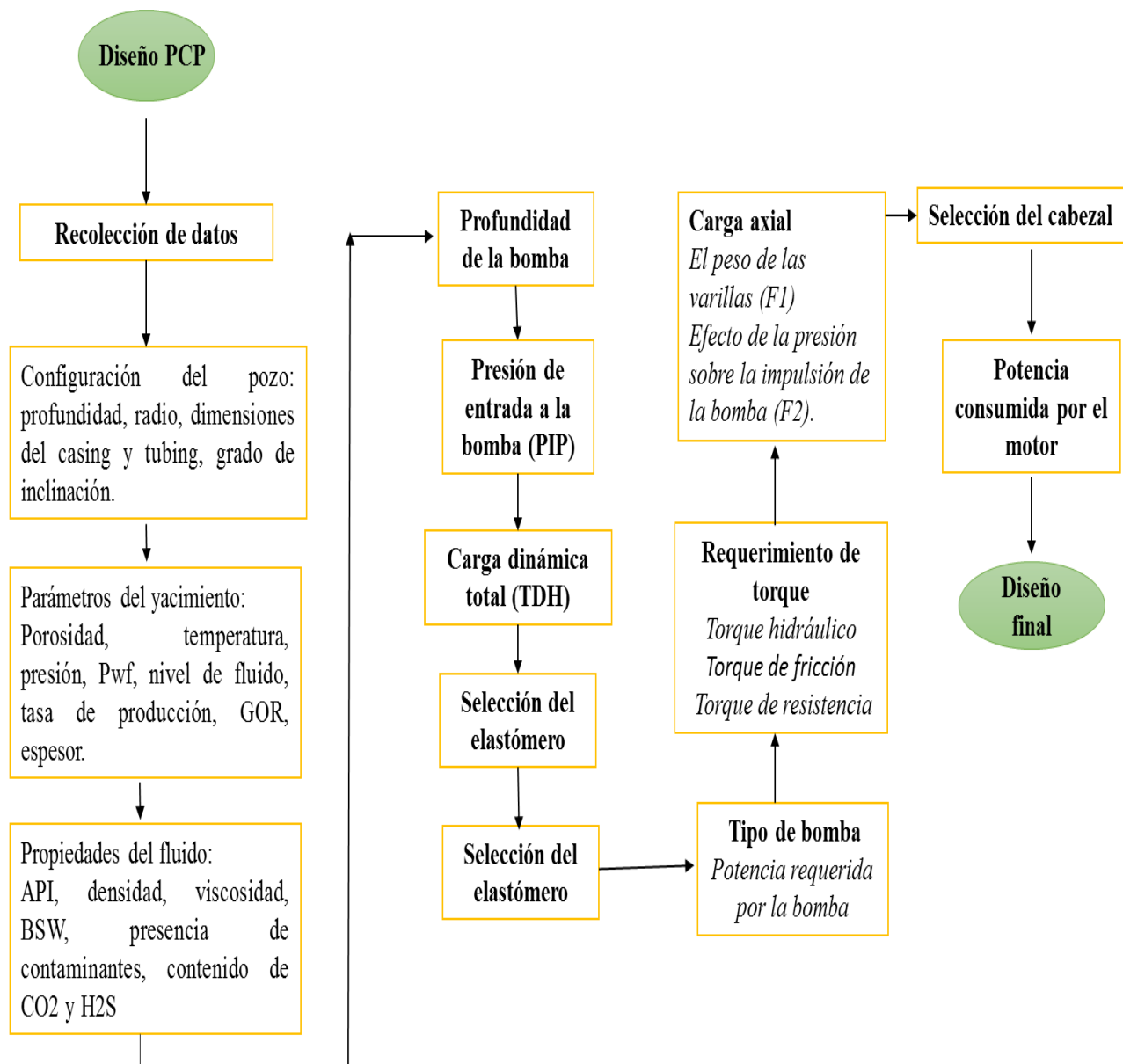


Figura 20. Diagrama de flujo para el diseño del sistema PCP

Tabla 17.

Resultados de potencia de los diseños de los SLA para cada caso

SLA	unidad/ Bomba	Especificación	Longitud del stroke (in)	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
				Potencia necesaria (KW)	Potencia necesaria (KW)	Potencia necesaria (KW)	Potencia necesaria (KW)
BM	640	Balanceada por aire	144.00	6.46	5.53	6.49	7.30
BM	640	Balanceada por aire	120.96	6.50	5.54	6.68	7.40
BM	640	Balanceada por aire	104.33	6.56	5.57	6.73	7.41
BM	640	CCW convencional	121.60	7.28	6.02	7.21	8.08
BM	640	CCW convencional	144.00	7.32	6.10	7.33	8.70
BM	640	CCW convencional	99.20	7.32	6.11	7.37	8.89
BM	640	CW convencional	121.60	7.56	6.16	7.66	9.16
BM	640	CW convencional	99.20	7.58	6.26	7.66	9.33
BM	640	CW convencional	144.00	7.63	6.43	7.67	9.50
BM	640	Mark II	111.85	6.56	5.57	6.73	7.41
BM	640	Mark II	127.93	6.90	5.99	6.82	7.69
BM	640	Mark II	144.00	7.32	6.03	7.30	8.66
BM	912	Balanceada por aire	144.00	6.46	5.53	6.50	7.30
BM	912	Balanceada por aire	120.64	6.50	5.54	6.68	7.40
BM	912	Balanceada por aire	101.38	6.58	5.68	6.81	7.62
BM	912	CCW convencional	121.60	7.28	6.02	7.21	8.08
BM	912	CCW convencional	144.00	7.32	6.10	7.33	8.70
BM	912	CCW convencional	99.20	7.32	6.12	7.37	8.91
BM	912	CW convencional	121.60	7.56	6.17	7.66	9.16
BM	912	CW convencional	99.20	7.60	6.26	7.66	9.33
BM	912	CW convencional	144.00	7.63	6.43	7.67	9.50
BM	912	Mark II	111.85	6.56	5.67	6.81	7.58
BM	912	Mark II	127.93	6.90	5.99	6.82	7.69
BM	912	Mark II	144.00	7.32	6.03	7.30	8.66
BES	1			127.12	77.02	89.50	66.79
BES	2			127.12	77.02	89.50	66.79
PCP				12.33	9.10	8.45	7.49

4. Evaluación de la huella de carbono producida por los sistemas de levantamiento artificial convencionales mediante programación en la herramienta Microsoft Excel

Como se había mencionado en el capítulo 1, para la evaluación la huella de carbono producida por los sistemas de levantamiento se utilizó la metodología del análisis de ciclo de vida (ACV), de tal forma que a continuación se procederá a desarrollar cada una de las etapas que permitió realizar el análisis. Así mismo, se creó un programa de Excel con el fin de realizar el cálculo de la huella de carbono, arrojando datos en unidades de TonCO₂ para los sistemas planteados.

4.1 Definición del objetivo y alcance

4.1.1 Objetivo. El objetivo de este proyecto es evaluar la huella de carbono producida por los sistemas de levantamiento artificial convencionales en un campo colombiano, debido a la trascendencia que tiene la cantidad de emisiones de gases efecto invernadero (GEI) como impacto ambiental en el ecosistema, por lo que se busca generar una iniciativa en la industria para diseñar y seleccionar los sistemas de levantamiento artificial convencionales teniendo en cuenta un parámetro ambiental.

4.1.2 Definición del alcance y límites. Este proyecto se limita al periodo de uso de los SLA, solo se tendrá en cuenta las emisiones generadas por el consumo de energía eléctrica de los sistemas; teniendo en cuenta los alcances que se definieron en el capítulo 1 para el análisis de la

huella de carbono, las emisiones a evaluar corresponden al alcance 2, el cual define la generación de electricidad fuera de la organización como una fuente de emisión indirecta.

Unidad funcional: en este proyecto se establece como unidad funcional la emisiones de CO₂ asociadas al consumo de electricidad (ton CO₂ eq.) por los sistemas de levantamiento cuando estos están en uso durante un periodo de tiempo de un (1) año.

Límites del sistema: como el ciclo de vida de un producto comprende varias etapas, para el análisis de la huella de carbono producida por los sistemas de levantamiento artificial se considera exclusivamente la etapa de uso. En la figura 21 se delimita el sistema en línea continua y de color rojo a la etapa correspondiente al uso.

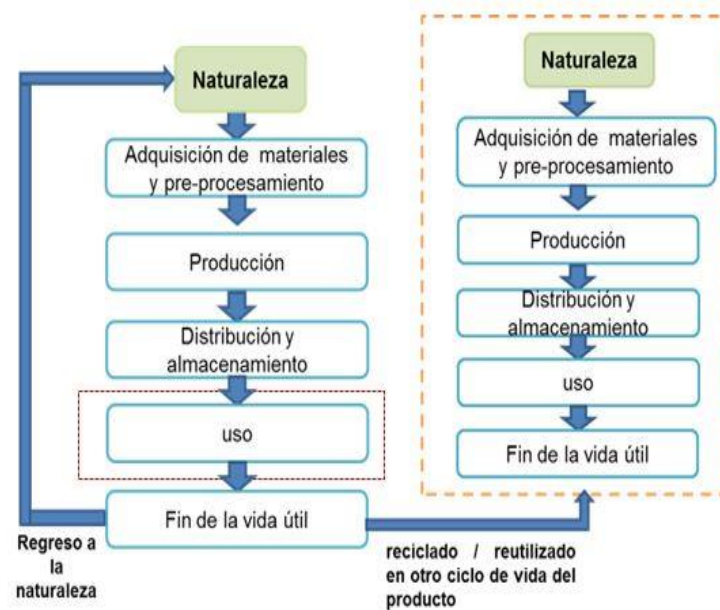


Figura 21. Límites del sistema Adaptado de ghgprotocol.org/product-standard.

4.2 Análisis del inventario

Esta etapa implica la recopilación de los datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas de un sistema del producto. Con base en la unidad funcional anteriormente descrita, el sistema tendrá el siguiente flujo de entrada y salida mostrado en la tabla 18 y diagrama de flujo mostrado en la figura 22.

Tabla 18.

Emisiones de acuerdo al alcance 2.

Entrada	Salida
Consumo de electricidad	Emisiones de CO2 por Kwh

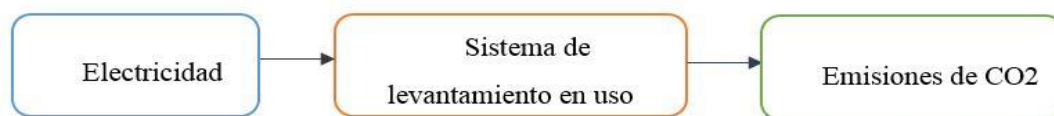


Figura 22. Diagrama de flujo del sistema.

4.2.1 Cálculo de la huella de carbono. Para calcular la huella que produce los sistemas de levantamiento artificial convencionales fue necesario crear unos casos de estudio (capítulo 2), así mismo diseñar los sistemas de levantamiento para cada uno de los casos (capítulo 3) y posteriormente proceder a realizar el cálculo mediante programación en la herramienta Microsoft Excel para determinar las emisiones de CO2.

El programa de Excel consta de una ventana de datos de entrada donde se ingresan datos del pozo, propiedades del yacimiento, datos generales, propiedades del diseño pertenecientes a los

sistemas de levantamiento bombeo mecánico, electrosumergible y bombeo de cavidades progresivas, así mismo contiene los procedimientos utilizados para el diseño de los sistemas y de igual forma contiene una ventana de salida de datos donde esta presenta mediante macros, el resultado del valor de las emisiones de dióxido de carbono, también presenta una ventana de sensibilidad de variable con el fin de determinar cuál variable de diseño o propiedades son las que más afectan las emisiones de CO₂ y finalmente contiene una ventana de balance energético y otra de análisis financiero basado en los resultados de huella de carbono; ver apéndice A macro realizada para el cálculo de la huella de carbono.

La mayoría de sistemas de levantamiento artificial en Colombia trabajan con motor eléctrico, por tal motivo en el diseño de estos sistemas mediante la herramienta Microsoft Excel se determinó cuanta energía se requiere en superficie al año (Kwh/año) para que el sistema de levantamiento funcione correctamente. Con este dato de energía se procedió a realizar el cálculo de la huella de carbono (Ton CO₂/ año) para cada uno de los SLA, teniendo en cuenta la ecuación 1 descrita en el capítulo 1, para esta ecuación es necesario un factor de emisión, el cual según la Unidad de planeación minero energética (UPME 2015) es de 199 gCO₂/Kwh.

4.2.1.1 Huella de carbono bombeo mecánico. Aplicando la ecuación 1, el dato de actividad corresponde a la energía consumida por el motor o la unidad de bombeo al año en Kwh/año y el factor de emisión es de 199 gCO₂/Kwh.

$$\text{Por lo tanto el cálculo sería } \text{Ton CO}_2/\text{año} = \frac{\text{Kwh}}{\text{año}} \times 199 \frac{\text{gCO}_2}{\text{Kwh}} \times \left(\frac{1 \text{ Ton}}{1000000 \text{ g}} \right)$$

Ver apéndice A-4 y A-5 donde se muestra el cálculo de la huella de carbono basado en los parámetros establecidos en este proyecto para cada uno de los casos de estudio para una unidad de bombeo 640 y 912.

De igual manera, en la tabla 19 se muestran los resultados de la huella de carbono para los casos establecidos que emiten las unidades durante un año.

4.2.1.2 Huella de carbono bombeo electrosumergible. La energía que el transformador le transmite al motor eléctrico seleccionado en el diseño del sistema, se multiplica por la unidad de tiempo (h) con el fin de determinar la energía consumida por el sistema de levantamiento durante un periodo de tiempo de un año (kwh/año); es decir, $\frac{Kwh}{año} = Kw * tiempo (h)$ y el resultado es el dato de la actividad que se necesita para aplicar la ecuación 1 junto con un factor de emisión de 199 gCO₂/kwh.

Por consiguiente el cálculo de la huella de carbono es $Ton CO_2/año = Kwh/año * FE * 1/1000000$. En la tabla 19 se muestran los resultados de este cálculo para los casos de estudio y para dos series de bombas; sin embargo ver apéndice A-6 donde se muestra el resultado completo del cálculo de la huella.

4.2.1.3 Huella de carbono bombeo cavidades progresivas. En este sistema al igual que en los anteriores se aplica la misma metodología para el cálculo de las emisiones de CO₂. En la tabla 19 se muestra el resultado del cálculo de la huella para los casos de estudio, sin embargo en el apéndice A-7 se muestra el cálculo completo de la huella de carbono.

4.3 Evaluación del impacto del ciclo de vida

Los resultados de la medición de la huella de carbono para los sistemas de levantamiento artificial convencionales se evaluaron en las diferentes cuencas sedimentarias del país seleccionadas en el capítulo 2. Dichos resultados corresponden a emisiones indirectas debido al consumo de energía eléctrica de los SLA, por consiguiente este indicador incluye únicamente las emisiones por CO₂. En esta sección se mostrará el resultado para los diferentes casos de estudio establecidos.

4.3.1 Bombeo mecánico. En la figura 23 y 24 se muestran los resultados de huella de carbono para los casos de estudio establecidos y así mismo para las diferentes unidades de bombeo.

De igual manera, las figuras 23 y 24 permiten concluir que la unidad que genera más emisiones de CO₂ es la Cw convencional, excepto en el caso 2 que es la Mark II cuando funciona con la longitud del stroke más largo (ver apéndice A9), así mismo se puede notar que no existe gran diferencia de emisiones entre una unidad 640 y 920, finalmente en el caso 4 es donde se generan más emisiones indirectas con relación a los otros casos.

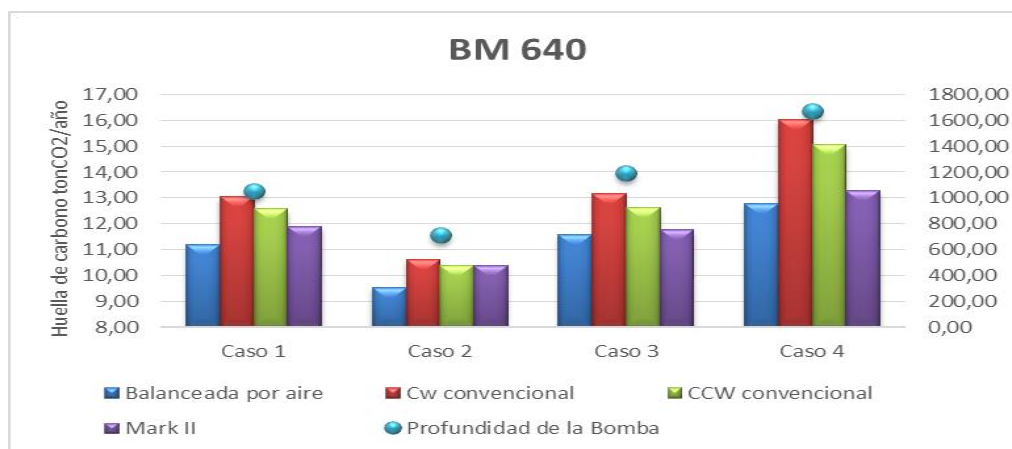


Figura 23. Resultado huella de carbono para bombeo mecánico 640

Tabla 19.

Resultados del cálculo de la huella de carbono para los SLA

SLA	unidad/ Bomba	Especificación	longitud del stroke (in)	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
				Huella de carbono (TonCO2 /año)	Huella de carbono (TonCO2 /año)	Huella de carbono (TonCO2 /año)	Huella de carbono (TonCO2 /año)
BM	640	Balanceada por aire	144	11.11	9.50	11.15	12.55
BM	640	Balanceada por aire	120.962	11.18	9.53	11.49	12.73
BM	640	Balanceada por aire	104.327	11.28	9.58	11.57	12.74
BM	640	CCW convencional	121.6	12.52	10.35	12.39	13.89
BM	640	CCW convencional	144	12.59	10.48	12.60	14.96
BM	640	CCW convencional	99.2	12.59	10.51	12.67	15.28
BM	640	CW convencional	121.6	13.00	10.60	13.17	15.75
BM	640	CW convencional	99.2	13.03	10.76	13.17	16.05
BM	640	CW convencional	144	13.12	11.06	13.19	16.34
BM	640	Mark II	111.851	11.28	9.58	11.57	12.74
BM	640	Mark II	127.926	11.86	10.30	11.72	13.22
BM	640	Mark II	144	12.58	10.36	12.55	14.89
BM	912	Balanceada por aire	144	11.11	9.50	11.17	12.55
BM	912	Balanceada por aire	120.637	11.18	9.53	11.49	12.73
BM	912	Balanceada por aire	101.376	11.31	9.77	11.71	13.11
BM	912	CCW convencional	121.6	12.52	10.35	12.39	13.89
BM	912	CCW convencional	144	12.59	10.48	12.60	14.96
BM	912	CCW convencional	99.2	12.59	10.52	12.67	15.32
BM	912	CW convencional	121.6	13.00	10.61	13.17	15.75
BM	912	CW convencional	99.2	13.06	10.76	13.17	16.05
BM	912	CW convencional	144	13.12	11.06	13.19	16.34
BM	912	Mark II	111.851	11.28	9.75	11.71	13.04
BM	912	Mark II	127.926	11.86	10.30	11.73	13.22
BM	912	Mark II	144	12.58	10.36	12.55	14.89
BES	1			218.56	132.43	153.88	114.84
BES	2			218.56	132.43	153.88	114.84
PCP				21.21	15.65	14.54	12.88

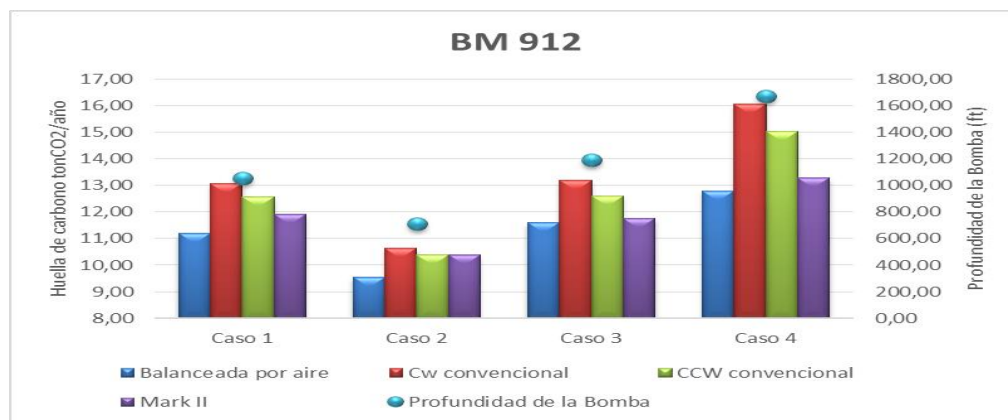


Figura 24. Resultado huella de carbono para bombeo mecánico 912

4.3.2 Bombeo Electrosomergible. En la figura 25 se evidencia los resultados del cálculo de la huella de carbono donde se observa que el caso 1 es el que más emisiones indirectas de dióxido de carbono genera, se puede relacionar esta tendencia con la planteada por la gravedad específica del fluido, así mismo, se refleja que no existe discrepancia entre las bombas seleccionadas en el capítulo 3.

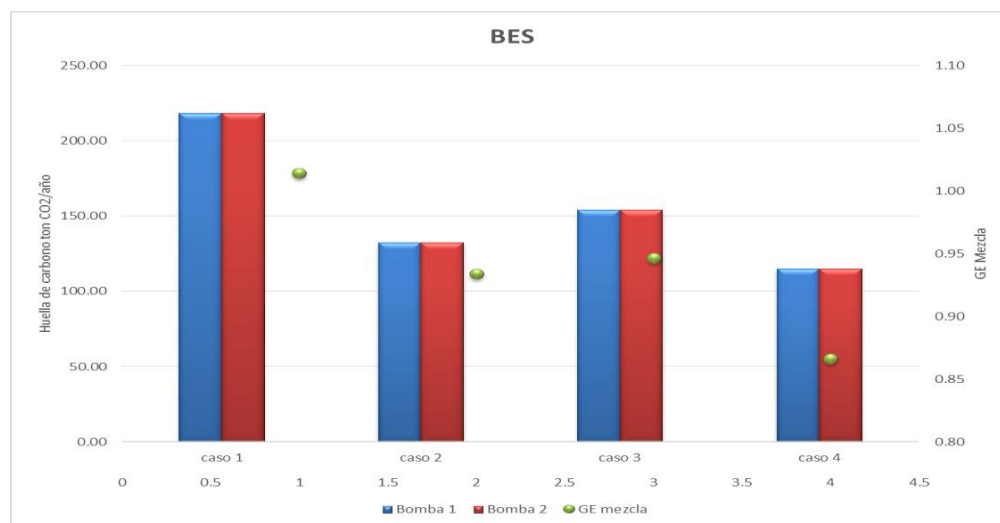
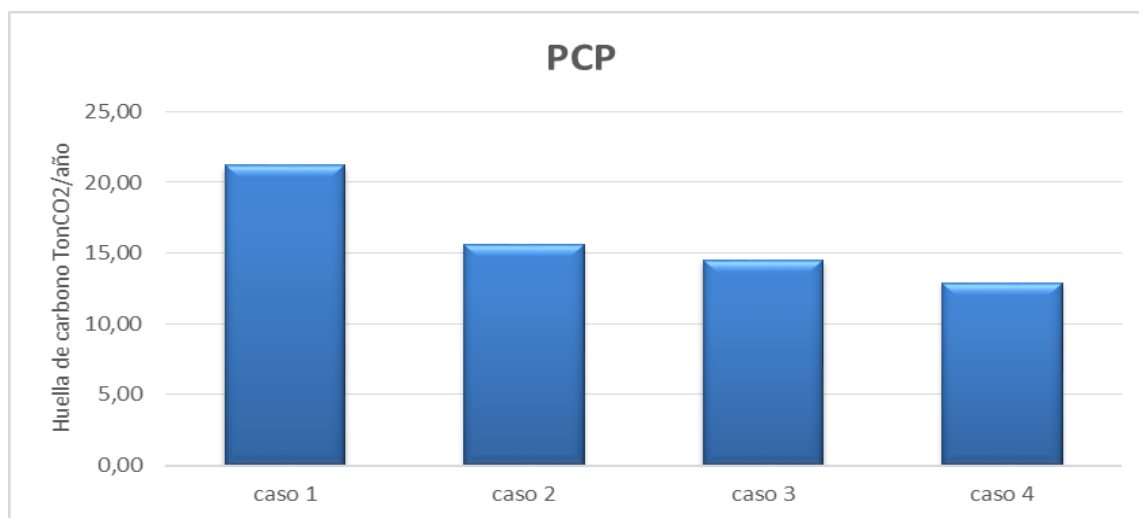


Figura 25. Huella de carbono generada por el sistema Electrosomergible

4.3.3 Bombeo Cavidades progresivas. En la figura 26 se muestra los resultados de las emisiones de CO₂ generadas por este sistema, donde se observa que el sistema de levantamiento genera más emisiones en el caso 1, debido a las condiciones de operación y diseño; revisando los parámetros establecidos en el capítulo 2 se puede observar que existe un mayor torque de resistencia en el primer caso como consecuencia de la alta viscosidad del fluido, por lo cual se refleja la importancia de esta propiedad en el sistema.



*Figura 26.*Huella de carbono emitida por el sistema PCP.

4. 3.4 Impactos ambientales. La energía eléctrica pasa por numerosas fases hasta llegar a su uso final, en cada una de las cuales se realizan actividades con un potencial impacto sobre el entorno. En la tabla 20 se relacionan los impactos ambientales más significativos asociados a la generación de la energía para el respectivo consumo.

Tabla 20.
Impactos ambientales significativos

Recurso	Causa	Aspecto	Impacto	Tipo de impacto
Energía eléctrica	Funcionamiento de los sistemas de levantamiento artificial convencionales	Consumo de energía	1. Calentamiento global.	Negativo
			2. Agotamiento de recursos naturales.	
			3. Disminución de la capa de ozono.	

4.4 Interpretación

De acuerdo a los resultados de emisiones de CO₂ de los sistemas de levantamiento diseñados para los casos de estudio, se evidencia la tendencia que el sistema de levantamiento que menos huella de carbono genera indirectamente es el bombeo mecánico, seguido del PCP, y por último el que más huella emite es el sistema bombeo electrosumergible. Por consiguiente, como se mencionó anteriormente como la huella se calculó con base en el indicador de energía eléctrica, entre más energía requiera el equipo en superficie más huella de carbono emite el sistema. En la figura 27, se muestra los sistemas de levantamiento evaluados en un orden del que menos emite CO₂ al que más emisiones genera para el primer caso. Sin embargo ver apéndice A-9 para observar los resultados de todos los casos de estudio planteados.

CASO 1							
SLA	unidad/ Bomba	Especificación	longitud del stroke (in)	Potencia necesaria (KW)	Energía consumida por el sistema en un año (Kwh/año)	Costo de la energía anualmente (MUSD)	Huella de carbono (TonCO2/año)
BM	640	Balanceada por aire	144.00	6.46	5.58E+04	\$ 7.88	11.11
BM	912	Balanceada por aire	144.00	6.46	5.58E+04	\$ 7.88	11.11
BM	640	Balanceada por aire	120.96	6.50	5.62E+04	\$ 7.93	11.18
BM	912	Balanceada por aire	120.64	6.50	5.62E+04	\$ 7.93	11.18
BM	640	Balanceada por aire	104.33	6.56	5.67E+04	\$ 8.01	11.28
BM	640	Mark II	111.85	6.56	5.67E+04	\$ 8.01	11.28
BM	912	Mark II	111.85	6.56	5.67E+04	\$ 8.01	11.28
BM	912	Balanceada por aire	101.38	6.58	5.68E+04	\$ 8.03	11.31
BM	640	Mark II	127.93	6.90	5.96E+04	\$ 8.42	11.86
BM	912	Mark II	127.93	6.90	5.96E+04	\$ 8.42	11.86
BM	640	CCW convencional	121.60	7.28	6.29E+04	\$ 8.89	12.52
BM	912	CCW convencional	121.60	7.28	6.29E+04	\$ 8.89	12.52
BM	640	Mark II	144.00	7.32	6.32E+04	\$ 8.93	12.58
BM	912	Mark II	144.00	7.32	6.32E+04	\$ 8.93	12.58
BM	640	CCW convencional	144.00	7.32	6.33E+04	\$ 8.94	12.59
BM	912	CCW convencional	144.00	7.32	6.33E+04	\$ 8.94	12.59
BM	640	CCW convencional	99.20	7.32	6.33E+04	\$ 8.94	12.59
BM	912	CCW convencional	99.20	7.32	6.33E+04	\$ 8.94	12.59
BM	640	CW convencional	121.60	7.56	6.53E+04	\$ 9.23	13.00
BM	912	CW convencional	121.60	7.56	6.53E+04	\$ 9.23	13.00
BM	640	CW convencional	99.20	7.58	6.55E+04	\$ 9.25	13.03
BM	912	CW convencional	99.20	7.60	6.56E+04	\$ 9.27	13.06
BM	640	CW convencional	144.00	7.63	6.59E+04	\$ 9.31	13.12
BM	912	CW convencional	144.00	7.63	6.59E+04	\$ 9.31	13.12
PCP				12.33	1.07E+05	\$ 15.05	21.21
BES	1			127.12	1.10E+06	\$ 155.13	218.56
BES	2			127.12	1.10E+06	\$ 155.13	218.56

Figura 27.Orden de emisiones de CO2 de los sistemas de levantamiento para caso 1.

4.4.1 Bombeo mecánico. Este sistema de levantamiento artificial es el que arrojó los resultados más bajos de generación de huella de carbono; para este sistema se analizaron tres unidades a diferentes longitudes de stroke, una de menor longitud, una intermedia y una mayor.

La primera unidad “Balanceada por Aire (BxA)” arrojó menores resultados de huella de carbono en la mayoría de casos, así mismo se evidenció una relación indirecta entre la longitud del stroke y la huella de carbono, a mayor longitud de stroke menor huella de carbono, De igual forma de la tabla 21 y 22 se puede observar que para la unidad convencional, que esta a su vez se diferencia por el sentido de su funcionamiento, si este es a favor de las manecillas del

reloj (CW) o en contra (CCW) se evidencia que no existe una tendencia clara de la influencia de longitud del stroke,, mientras que para las unidades Mark II se encuentra una relación directa y de mayor impacto que las unidades anteriores, es decir que a mayor longitud del stroke, mayor generación de huella de carbono.

4.4.2 Bombeo electrosumergible. Para el caso del bombeo electrosumergible se realizó el análisis de sensibilidad del comportamiento del sistema con la variación de dos bombas de la misma casa fabricante con diferente diámetro nominal pero que se encontraran en el rango de capacidad de bombeo de 300 Bls/d de líquido; los resultados manifestaron que no hubo variación de la emisión de huella de carbono entre una y otra, a pesar de manejar diferentes capacidades de elevación y potencia consumida por etapa, ver tabla 23.

Tabla 21.

Relación entre longitud de stroke y huella de carbono par BXA y CCW

		Balanceada por aire			CCW convencional		
		Longitud mayor	Longitud intermedia	Longitud menor	Longitud mayor	Longitud intermedia	Longitud menor
	Longitud del stroke (in)	144.0	121.0	104.3	144.0	121.6	99.2
Caso 1	Huella de carbono (TonCO2/año)	11.1	11.2	11.3	12.6	12.5	12.6
Caso 2	Huella de carbono (TonCO2/año)	9.5	9.5	9.6	10.5	10.4	10.3
Caso 3	Huella de carbono (TonCO2/año)	11.5	11.6	11.7	12.6	12.5	12.7
Caso 4	Huella de carbono (TonCO2/año)	12.5	12.7	13.0	14.9	15.0	15.3

Tabla 22.

Relación entre longitud de stroke y huella de carbono para CW y Mark II

		CW convencional			Mark II		
		Longitud mayor	Longitud intermedia	Longitud menor	Longitud mayor	Longitud intermedia	Longitud menor
	Longitud del stroke (in)	144.0	121.6	99.2	144.0	127.9	111.9
Caso 1	Huella de carbono (TonCO2/año)	13.1	13.0	13.0	12.6	11.9	11.3
Caso 2	Huella de carbono (TonCO2/año)	10.8	10.6	10.5	11.1	10.3	9.8
Caso 3	Huella de carbono (TonCO2/año)	13.2	13.2	13.2	12.4	11.7	11.2
Caso 4	Huella de carbono (TonCO2/año)	15.8	16.0	16.3	13.9	13.2	12.7

Tabla 23.

Relación de bomba y huella de carbono para sistema BES

		Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
	Capacidad de elevación (Ft)	18.7	20.3	20.1	21.9
BES 1	Huella de carbono (Ton CO2/año)	218.56	132.43	153.88	114.84
	Capacidad de elevación (Ft)	20.7	22.5	22.2	24.2
BES 2	Huella de carbono (Ton CO2/año)	218.56	132.43	153.88	114.84

4.4.3 Bombeo cavidades progresivas. Este sistema de levantamiento artificial mostró una particularidad con respecto a los anteriores SLA, según el análisis realizado en la evaluación del impacto del ciclo de vida (sección 4.3) en las gráficas de huella de carbono la tendencia del sistema bombeo mecánico es similar a la descrita por el nivel de fluido y para el BES por la relación de gravedad específica de la mezcla, por lo cual se infiere que estas variables son principales para definir el comportamiento de los sistemas, el sistema PCP sigue otra tendencia lo cual llevo a hacer una revisión de los parámetros de diseño evidenciando que un factor importante en el cálculo de las emisiones de CO₂ (apéndice A-7) es el torque de resistencia el cual es función de la viscosidad del fluido, por tal motivo se graficó respectiva variable (figura 28) donde se muestra la tendencia del sistema a generar más huella de carbono entre más viscoso sea el fluido.

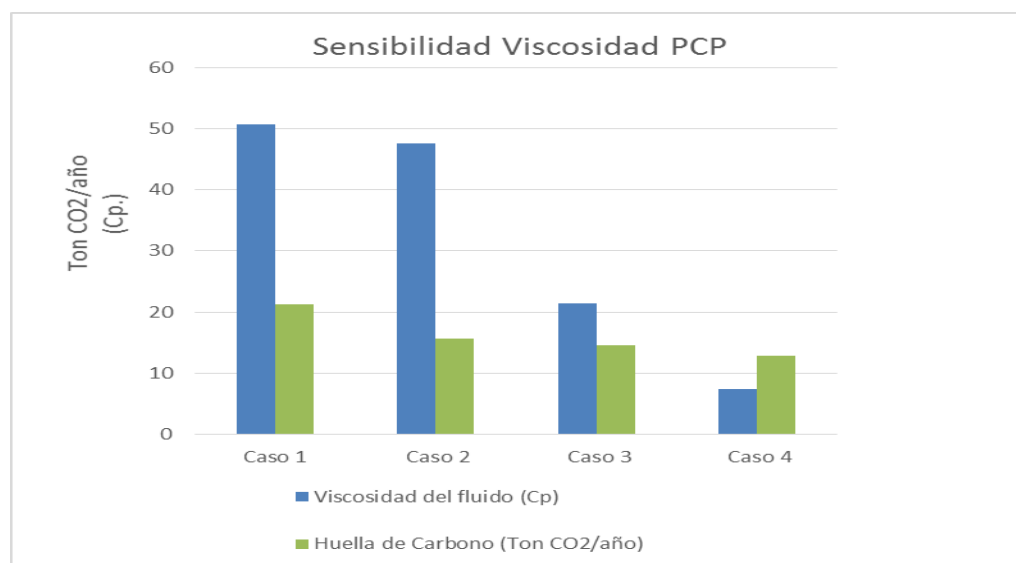


Figura 28.Relación entre viscosidad y huella de carbono para PCP

5. Balance energético

El balance energético que se propone en este capítulo se realiza comparando el consumo de energía de los sistemas de levantamiento, expresado en unidad energética (kwh), durante un periodo de tiempo de un año y la energía generada por la combustión de los barriles de petróleo producidos por cada pozo durante un año.

La energía generada por la combustión de un barril de petróleo (EGC) es calculada teniendo en cuenta la fracción molar de los componentes del crudo y el respectivo poder calorífico, como los casos de estudio fueron planteados según las cuencas sedimentarias del país, se encuentra crudos pesados y livianos, por consiguiente para un crudo liviano la energía generada por cada kilogramo de aceite es de 13.01 Kwh/kg y para un crudo pesado es de 11.73 Kwh/Kg; estos valores son multiplicados por la densidad del crudo de cada caso de estudio con el fin de realizar la conversión a Kwh/bbl (Ver tabla 24), además se planteó un caudal de 300 bbls/d por lo que es necesario multiplicarlo por los días del año para tener la producción del año, por lo tanto para determinar la energía generada por la combustión de los barriles de petróleo establecidos en los casos de estudio, se realizó el análisis utilizando la ecuación 24.

$$\frac{E_{generada}}{bbl} = \text{tasa de produccion} * EGC * (1 - BSW) * \text{tiempo (d)} \quad (24)$$

Por consiguiente, con el dato de energía consumida por el sistema de levantamiento al año y la energía generada por la combustión de los barriles de petróleos se realiza el balance energético

donde $\text{Balance energerico } \left(\frac{kwh}{año}\right) = E_{generada} - E_{consumida}$

Tabla 24.

Energía generada por la combustión de un barril de petróleo

composición								
Compone nte	Aceite pesado	Fracción aceite pesado	Aceite liviano	Fracción aceite liviano	Peso molecular	Poder calorífico (kwh/kg)	Poder calorífico aceite pesado (kwh/kg)	Poder calorífico aceite liviano (kwh/kg)
C ₁	48.83	0.49	64.36	0.64	16.04	13.88	6.78	8.93
C ₂	2.75	0.03	7.52	0.08	30.07	13.17	0.36	0.99
C ₃	1.93	0.02	4.74	0.05	44.09	12.86	0.25	0.61
C ₄	1.60	0.02	4.12	0.04	58.12	12.69	0.20	0.52
C ₅	1.15	0.01	3.97	0.04	72.14	12.59	0.14	0.50
C ₆	1.59	0.02	3.38	0.03	86.18	11.27	0.18	0.38
C ₇ ⁺	42.15	0.42	11.91	0.12	103.00	9.05	3.82	1.08
TOTAL=							11.73	13.01

Como los resultados obtenidos son valores de gran magnitud se decidió manejar los datos en porcentaje con el fin de obtener un análisis más claro, así que se tomó como cien por ciento la energía generada por la combustión del aceite, a continuación en la tabla 25, 26, 27 se muestra la tabulación de la información recolectada para el bombeo mecánico, bombeo electrosumergible y bombeo de cavidades progresivas, sin embargo ver apéndice A-11 para observar el análisis energético más detallado.

Tabla 25.

Balance energético para sistema BM

	Bombeo Mecánico	Energía consumida por la unidad	% de energía consumida	Energía generada por el uso del aceite	Balance Energético	% de energía Neta
Caso 1	Balanceada por aire	5.62E+04	0.28	2.04E+07	2.03E+07	99.72
	CW convencional	6.56E+04	0.32	2.04E+07	2.03E+07	99.68
	CCW convencional	6.32E+04	0.31	2.04E+07	2.03E+07	99.69
	Mark II	5.98E+04	0.29	2.04E+07	2.03E+07	99.71
Caso 2	Balanceada por aire	4.79E+04	0.04	1.31E+08	1.31E+08	99.96
	CW convencional	5.34E+04	0.04	1.31E+08	1.31E+08	99.96
	CCW convencional	5.22E+04	0.04	1.31E+08	1.31E+08	99.96
	Mark II	5.22E+04	0.04	1.31E+08	1.31E+08	99.96
Caso 3	Balanceada por aire	5.83E+04	0.04	1.62E+08	1.62E+08	99.96
	CW convencional	6.62E+04	0.04	1.62E+08	1.62E+08	99.96
	CCW convencional	6.34E+04	0.04	1.62E+08	1.62E+08	99.96
	Mark II	5.91E+04	0.04	1.62E+08	1.62E+08	99.96
Caso 4	Balanceada por aire	6.42E+04	0.06	1.08E+08	1.08E+08	99.94
	CW convencional	8.06E+04	0.07	1.08E+08	1.08E+08	99.93
	CCW convencional	7.57E+04	0.07	1.08E+08	1.08E+08	99.93
	Mark II	6.67E+04	0.06	1.08E+08	1.08E+08	99.94

Tabla 26.

Balance energético bombeo electrosumergible

Bombeo Electrosumergible	Energía consumida por la unidad	% de energía consumida	Energía generada por el uso del aceite	Balance Energético	% de energía Neta
Caso 1	1.10E+06	5.39	2.04E+07	1.93E+07	94.61
Caso 2	6.65E+05	0.51	1.31E+08	1.31E+08	99.49
Caso 3	7.73E+05	0.48	1.62E+08	1.61E+08	99.52
Caso 4	5.77E+05	0.53	1.08E+08	1.08E+08	99.47

Tabla 27.

Balance energético Bombeo de cavidades progresivas

Bombeo PCP	Energía consumida por la unidad	% de energía consumida	Energía generada por el uso del aceite	Balance Energético	% de energía Neta
Caso 1	1.07E+05	0.52	2.04E+07	2.03E+07	99.48
Caso 2	7.86E+04	0.06	1.31E+08	1.31E+08	99.94
Caso 3	7.30E+04	0.05	1.62E+08	1.62E+08	99.95
Caso 4	6.47E+04	0.07	9.74E+07	9.74E+07	99.93

Como se observó en la figura 27, para el bombeo mecánico no se encontró diferencia en los resultados tanto de huella de carbono como en la energía consumida entre una unidad 640 y una 912, por consiguiente la tabla 25 expresada anteriormente aplica para ambas unidades, así mismo en el BES se presenta un comportamiento igual al no haber diferencia en respectivos resultados sin importar el tipo de bomba por lo tanto esta condición se tiene en cuenta para el balance energético presentado en la tabla 26.

Por otra parte se realizaron cálculos para saber cuánta energía se iba a consumir por barril producido de fluido (agua y aceite), los resultados se reflejan en la siguiente tabla 28.

Tabla 28.
Energía consumida por barril de fluido.

	Unidad	Energía consumida por la unidad	Energía generada por el uso del aceite	Qo (Bls/año)	Días del año	Producción en un año	Energía consumida Kwh/Bl	Energía generada Kwh/Bl
Caso 1	Balanceada por aire	5.6E+04	2.0E+07	30	360	10800	0.52	1888.24
	CW convencional	6.6E+04	2.0E+07	30	360	10800	0.61	1888.24
	CCW convencional	6.3E+04	2.0E+07	30	360	10800	0.58	1888.24
	Mark II	6.0E+04	2.0E+07	30	360	10800	0.55	1888.24
	BES	1.1E+06	2.0E+07	30	360	10800	10.2	1888.24
	PCP	1.1E+05	2.0E+07	30	360	10800	0.99	1888.24
Caso 2	Balanceada por aire	4.8E+04	1.3E+08	210	360	75600	0.44	1738.68
	CW convencional	5.3E+04	1.3E+08	210	360	75600	0.49	1738.68
	CCW convencional	5.2E+04	1.3E+08	210	360	75600	0.48	1738.68
	Mark II	5.2E+04	1.3E+08	210	360	75600	0.48	1738.68
	BES	6.7E+05	1.3E+08	210	360	75600	6.20	1738.68
	PCP	7.9E+04	1.3E+08	210	360	75600	0.73	1738.68
Caso 3	Balanceada por aire	5.8E+04	1.6E+08	255	360	91800	0.54	1761.94
	CW convencional	6.6E+04	1.6E+08	255	360	91800	0.61	1761.94
	CCW convencional	6.3E+04	1.6E+08	255	360	91800	0.59	1761.94
	Mark II	5.9E+04	1.6E+08	255	360	91800	0.55	1761.94
	BES	7.7E+05	1.6E+08	255	360	91800	7.13	1761.94
	PCP	7.3E+04	1.6E+08	255	360	91800	0.68	1761.94
Caso 4	Balanceada por aire	6.4E+04	1.1E+08	168	360	60480	0.59	1787.47
	CW convencional	8.1E+04	1.1E+08	168	360	60480	0.75	1787.47
	CCW convencional	7.6E+04	1.1E+08	168	360	60480	0.70	1787.47
	Mark II	6.7E+04	1.1E+08	168	360	60480	0.62	1787.47
	BES	5.8E+05	9.7E+07	168	360	60480	5.37	1787.47
	PCP	6.5E+04	9.7E+07	168	360	60480	0.60	1787.47

6. Análisis financiero

La operadora del Sistema Interconectado Nacional y administrador del Mercado de Energía Mayorista de Colombia (XM), estableció el precio de la energía en enero del 2018 con base en la metodología establecida por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (Greg), el cual es de \$423.731/kWh.

Por consiguiente, el costo de la energía anualmente consumida por el sistema de levantamiento artificial es determinada mediante la ecuación 25.

$$\text{Costo energia anual (\$)} = \frac{\text{energia consumida por elSLA}}{\text{año}} (Kwh) * \frac{\$423.731}{kwh} \quad (25)$$

Por otro lado se estableció un precio de venta de cincuenta dólares el barril de petróleo y se multiplico por la producción de aceite en un año para cada caso y así obtener las ganancias por venta de crudo, se restó el costo de la energía consumida a las ganancias por venta de crudo anteriormente hallada; al igual que en el balance energético los resultados se expresan en porcentaje, considerando como cien por ciento el dinero que ingresó por la venta de crudo y partiendo de este valor que porcentaje se gastó en el pago de consumo eléctrico ver tabla 28, 29 y 30 donde se tabulan los datos del balance financiero para los sistemas de levantamiento artificial planteados anteriormente.

De igual forma, se determinó la inversión por barril de fluido producido, expresando este análisis en la tabla 32 y así mismo se realizó un resumen de los datos de inversión en energía en miles de dólares (MUSD) que se realiza durante un año para el funcionamiento de los sistemas de los sistemas de levantamiento (ver tabla 33).

Tabla 29.

Balance financiero Bombeo mecánico.

	Bombeo Mecánico	Dinero Invertido (MUSD)	% de dinero invertido	Ingresos por la venta (MUSD)	Balance Financiero (MUSD)	% Neto de dinero
Caso 1	balanceada por aire	7.94	1.47	540.00	532	98.53
	CW convencional	9.26	1.72	540.00	531	98.28
	CCW convencional	8.92	1.65	540.00	531	98.35
	Mark II	8.45	1.57	540.00	532	98.43
Caso 2	balanceada por aire	6.77	0.18	3,780.00	3,773	99.82
	CW convencional	7.54	0.20	3,780.00	3,772	99.80
	CCW convencional	7.37	0.19	3,780.00	3,773	99.81
	Mark II	7.38	0.20	3,780.00	3,773	99.80
Caso 3	balanceada por aire	8.23	0.18	4,590.00	4,582	99.82
	CW convencional	9.35	0.20	4,590.00	4,581	99.80
	CCW convencional	8.95	0.19	4,590.00	4,581	99.81
	Mark II	8.35	0.18	4,590.00	4,582	99.82
Caso 4	balanceada por aire	9.07	0.30	3,024.00	3,015	99.70
	CW convencional	11.39	0.38	3,024.00	3,013	99.62
	CCW convencional	10.69	0.35	3,024.00	3,013	99.65
	Mark II	9.42	0.31	3,024.00	3,015	99.69

Tabla 30.
Balance financiero BES.

Bombeo Electrosumergible	Dinero Invertido (MUSD)	% de dinero invertido	Ingresos por la venta (MUSD)	Balance Financiero	% Neto de dinero
Caso 1	155.13	28.73	540.00	384.87	71.27
Caso 2	94.00	2.49	3780.00	3686.00	97.51
Caso 3	109.22	2.38	4590.00	4480.78	97.62
Caso 4	81.51	2.70	3024.00	2942.49	97.30

Tabla 31.
Balance financiero PCP.

Bombeo PCP	Dinero Invertido (MUSD)	% de dinero invertido	Ingresos por la venta (MUSD)	Balance Financiero	% Neto de dinero
Caso 1	15.05	2.79	540.00	525	97.21
Caso 2	11.11	0.29	3,780.00	3,769	99.71
Caso 3	10.32	0.22	4,590.00	4,580	99.78
Caso 4	9.14	0.30	3,024.00	3,015	99.70

Tabla 32.

Inversión por barril producido

	Unidad / Bomba	Inversión (MUSD) \$	Qt (Bls/d)	Días del año	Producción en un año	Dinero invertido Dólar/Bl \$
Caso 1	Balanceada por aire	7,942	300	360	108000	0.07
	CW convencional	9,262	300	360	108000	0.09
	CCW convencional	8,921	300	360	108000	0.08
	Mark II	8,452	300	360	108000	0.08
	BES	155,13	300	360	108000	1.44
	PCP	15,053	300	360	108000	0.14
Caso 2	Balanceada por aire	6,769	300	360	108000	0.06
	CW convencional	7,542	300	360	108000	0.07
	CCW convencional	7,369	300	360	108000	0.07
	Mark II	7,376	300	360	108000	0.07
	BES	94,00	300	360	108000	0.87
	PCP	11,107	300	360	108000	0.10
Caso 3	Balanceada por aire	8,228	300	360	108000	0.08
	CW convencional	9,354	300	360	108000	0.09
	CCW convencional	8,949	300	360	108000	0.08
	Mark II	8,345	300	360	108000	0.08
	BES	109,22	300	360	108000	1.01
	PCP	10,317	300	360	108000	0.10
Caso 4	Balanceada por aire	9,067	300	360	108000	0.08
	CW convencional	11,390	300	360	108000	0.11
	CCW convencional	10,687	300	360	108000	0.10
	Mark II	9,424	300	360	108000	0.09
	BES	81,51	300	360	108000	0.75
	PCP	9,145	300	360	108000	0.08

Tabla 33.

Resultados de inversión en energía para los SLA

SLA	unidad/ Bomba	Especificación	longitud del stroke (in)	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
				Inversión en energía al año (MUSD\$)	Inversión en energía al año (MUSD\$)	Inversión en energía al año (MUSD\$)	Inversión en energía al año (MUSD\$)
BM	640	Balanceada por aire	144	7.88	6.75	7.92	8.91
BM	640	Balanceada por aire	120.962	7.93	6.77	8.15	9.03
BM	640	Balanceada por aire	104.327	8.01	6.80	8.21	9.04
BM	640	CCW convencional	121.6	8.89	7.35	8.80	9.86
BM	640	CCW convencional	144	8.94	7.44	8.95	10.62
BM	640	CCW convencional	99.2	8.94	7.46	8.99	10.85
BM	640	CW convencional	121.6	9.23	7.52	9.35	11.18
BM	640	CW convencional	99.2	9.25	7.63	9.35	11.39
BM	640	CW convencional	144	9.31	7.85	9.36	11.60
BM	640	Mark II	111.851	8.01	6.80	8.21	9.04
BM	640	Mark II	127.926	8.42	7.31	8.32	9.38
BM	640	Mark II	144	8.93	7.36	8.91	10.57
BM	912	Balanceada por aire	144	7.88	6.75	7.93	8.91
BM	912	Balanceada por aire	120.637	7.93	6.77	8.15	9.03
BM	912	Balanceada por aire	101.376	8.03	6.93	8.31	9.30
BM	912	CCW convencional	121.6	8.89	7.35	8.80	9.86
BM	912	CCW convencional	144	8.94	7.44	8.95	10.62
BM	912	CCW convencional	99.2	8.94	7.47	8.99	10.88
BM	912	CW convencional	121.6	9.23	7.53	9.35	11.18
BM	912	CW convencional	99.2	9.27	7.63	9.35	11.39
BM	912	CW convencional	144	9.31	7.85	9.36	11.60
BM	912	Mark II	111.851	8.01	6.92	8.31	9.25
BM	912	Mark II	127.926	8.42	7.31	8.33	9.38
BM	912	Mark II	144	8.93	7.36	8.91	10.57
BES	1			155.13	94.00	109.22	81.51
BES	2			155.13	94.00	109.22	81.51
PCP				15.05	11.11	10.32	9.14

7. Conclusiones

Según los sistemas evaluados, un sistema de levantamiento artificial que genere menos emisiones de dióxido de carbono, será el que menos energía necesite y a su vez los menores costos financieros, es decir, estos tres parámetros son directamente proporcionales entre sí.

Para el bombeo mecánico, en la mayoría de los casos evaluados, la unidad balanceada por aire genera menores emisiones de dióxido de carbono, seguida por la unidad Mark II y, por último, el que mayor impacto genera es la unidad convencional. En esta última unidad se encontró que es más eficiente cuando rota en contra de las manecillas del reloj.

En las unidades balanceadas por aire, se observó que mientras más larga sea el recorrido del stroke menor será el consumo energético, por su parte, con la unidad Mark II pasa todo lo contrario, mientras más larga sea longitud del stroke mayor consumo energético y finalmente en la unidad convencional los resultados son variables.

Las propiedades del pozo influyen en la cantidad de energía consumida por los sistemas, ocasionando variaciones en las emisiones de dióxido de carbono. En el sistema bombeo mecánico la profundidad a la cual se sumerja la bomba refleja la tendencia de huella de carbono y para el bombeo electrosumergible es la relación de gravedad específica del fluido.

La propiedad que establece la tendencia de emisiones de dióxido de carbono para el sistema bombeo cavidades progresivas (PCP) es la viscosidad del fluido, mostrando que a mayor viscosidad mayor será el gasto energético y así mismo más huella de carbono.

La metodología de evaluación de la huella de carbono mediante el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) permite concluir que el sistema de levantamiento que menos huella de carbono genera indirectamente es el bombeo mecánico, seguido del bombeo por cavidades progresivas, y por último el que más huella genera es el sistema bombeo electrosumergible.

Al analizar los resultados obtenidos se encontró una concordancia tanto en la huella de carbono como en el consumo de energía y costo operativo anualmente para la unidad bombeo mecánico 640 y una 912, así mismo en el BES respectivos resultados son proporcionales sin importar el tipo de bomba.

8. Recomendaciones

Se recomienda realizar la evaluación de la huella de carbono emitida por los sistemas de levantamiento artificial convencionales para todas las etapas del ciclo de vida, es decir, la adquisición de materiales y pre procesamiento, producción y el fin de su vida útil.

Las bombas electrosumergibles se seleccionan dependiendo de la tasa de producción, por lo cual se sugiere variar la tasa y así mismo seleccionar diferentes modelos de bomba, serie de motores, diferentes números de cable para determinar las pérdidas de voltaje hasta la profundidad de la bomba y así determinar la potencia requerida por el transformador que es el equipo que proporciona la energía al sistema y por consiguiente determinar la huella de carbono y realizar un análisis e interpretación de resultados según la variación de la tasa.

Uno de los equipos de subsuelo del sistema cavidades progresivas es la bomba PCP, esta se selecciona dependiendo del caudal de diseño planteado, por consiguiente es recomendable variar el modelo de la bomba, teniendo en cuenta que la máxima velocidad de bombeo es 300 rpm y así mismo variar el torque de fricción valor que se determina en el ensayo de la bomba y con base a estos respectivos cambios determinar las emisiones de CO₂ del sistema.

Según la Agencia nacional de hidrocarburos (ANH) en Colombia existe 450 campos activos, se sugiere aplicar la metodología de evaluación de huella de carbono de este proyecto en un campo colombiano activo.

Realizar el análisis de huella de carbono para otros sistemas de levantamiento artificial, con el fin de complementar la base de datos y tener más opciones para elegir el SLA con menor huella de carbono.

Desarrollar un plan de acción con el fin de disminuir el impacto ambiental generado por los sistemas de levantamiento artificial, o en su defecto mitigarlo, teniendo en cuenta los resultados y datos planteados en el desarrollo de este proyecto.

Referencias Bibliográficas

- Atance, L. A., Marín, I. C., Uranga, O. R., & Luengo, E. R. Criterios de selección de un estándar para la medida de la huella de carbono.
- Arismendi, A. y Harrysong, S. (2007). *Optimización utilizando modelaje del bombeo electrosumergible Caracas*,. Universidad Central de Venezuela. Recuperado de http://bibliogeo.ing.ucv.ve/DB/bfiegucv/EDOCS/SRed/2012/10/T041500005176-0-TEG_ANAYA_RAQUEL_2004-000.pdf
- Constante Barragán, L. A. (2002). *Localización, detección y análisis de fallas en el sistema de bombeo electrosumergible para la región amazónica del Ecuador* (Bachelor's thesis, LATACUNGA/ESPE/2002).
- Chacín, N. (Septiembre de 2013). *Bombeo de Cavidad Progresiva: Operaciones, Diagnóstico, Análisis de Falla yFalla yTrouble ShootingTrouble Shooting*. El tigre, Venezuela.
- Escalante, S. (2016). *Modulo III Bombeo Mecánico*.
- Hidalgo Carvajal, D. A. Estudio de huella de carbono que aporta la aviación de pasajeros dentro del territorio colombiano. Caso de estudio: aeronaves turborreactores.
- Ihobe. (2012). *Guía metodológica para la aplicación de la norma UNE-ISO 14064-1:2006 para el desarrollo de inventarios de Gases de Efecto Invernadero en organizaciones*. (Ihobe, I. Ingenieria, S. . Consultoria, & S. . Creara Consultores, Eds.). Vasco: Ihobe S.A.
- MATOS GUTIERREZ, J. A. (2009). Optimizacion de la producción por sistema pcp en campo pacaya. *Tesis de grado*. Lima, Perú: Universidad Nacional de ingeniería.

- Monsalve Duarte, D. A. (2015). *Evaluación técnica y financiera de la implementación de nuevas tecnologías para la mejora del rendimiento de los sistemas de levantamiento artificial de bombeo por cavidades progresivas*. Tesis. Bucaramanga.
- MONSALVE DUARTE, D. A. (2012). Evaluación de los modelos matemáticos utilizados en el diseño de los sistemas de levantamiento artificial de bombeo por cavidades progresivas. *Tesis de grado*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Muñoz, Á., y Torres, E. (2007). *Evaluación Técnica De Las Estrategias De Levantamiento Artificial Implementadas En Campos Maduros. Diseño De Una Herramienta Software De Selección*. Universidad Industrial de Santander.
- Naranjo Agudelo, A. D. J. Comportamiento de formaciones productoras (índice de productividad y curvas de comportamiento de afluencia).
- Naranjo Mena, E. X. (Julio de 2017). Análisis técnico económico para la implementación del sistema de levantamiento artificial con bombas de cavidad progresiva en el campo Vinita. *Tesis de grado*. Quito.
- Netzch. (2004). Manual de sistemas PCP. *Manual*.
- Partidas, I. H. (2003). *Bombeo Mecánico*. San Tomé Edo. Anzoátegui - Venezuela.
- Patiño Triana, L. M., & Trujillo Montenegro, D. (2016). *Evaluación técnica de la instalación de unidades de superficie de bombeo mecánico para la reducción de costos de inversión y costos de operación de los pozos nuevos en el Campo la Cira Infantas* (Bachelor's thesis, Fundación Universidad de América)
- Raya Rogelio, A. (2008). *Aplicación del Análisis Nodal para Incrementar la Productividad de un Pozo*. Universidad nacional autónoma de México.

- Ramirez, M. (2004). Bombeo Electrosumergible: Análisis, diseño, optimización y Trouble shooting. *Workshop international* . Venezuela.
- Rodriguez, W., y Robles, C. (2010). Herramienta software para el análisis y diseño de sistemas de levantamiento artificial convencionales. *tesis*. Bucaramanga.